

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
zaměřením tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

## KONFORMNÍ CHLAZENÍ VSTŘIKOVACÍCH FOREM

## CONFORMAL COOLING OF INJECTION MOULD

Petra Červinková

**KSP – TP - 830**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Luboš Běhálek – *TU v Liberci*  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*  
Konzultant diplomové práce: Ing. Jindřich Doležal, Ph.D.,  
*A. Raymond Jablonec nad Nisou, s. r. o.*

### Rozsah práce a příloh:

Počet stran	97
Počet tabulek	18
Počet obrázků	125
Počet příloh	2

**Datum:** 28. 5. 2010



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

Katedra strojírenské technologie

Studijní rok : 2008/2009

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Bc. Petra Č E R V I N K O V Á</b>
Studijní program	<b>N2301 Strojní inženýrství</b>
Studijní obor	<b>2303T002 Strojírenská technologie</b>
Zaměření	<b>Tváření kovů a plastů</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Konformní chlazení vstřikovacích forem**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Možnosti temperace vstřikovacích forem, vliv na kvalitu výstřiků. Konformní chlazení forem – výrobní možnosti a aplikace
2. Teplotní analýza výstřiků (termovizním měřením) zhotovených ve vstřikovací formě s konvenčním a konformním chlazením (v závislosti na materiálu formy)
3. Simulační analýza chlazení výstřiku v závislosti na způsobu temperace forem
4. Analýza struktury výstřiků v závislosti na způsobu temperace forem
5. Vyhodnocení a diskuze získaných výsledků, závěr

# ANOTACE

## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Bakalář: Petra Červinková

Téma práce: Konformní chlazení vstřikovacích forem

Conformal cooling of injection moulds

Číslo DP: KSP – TP - 830

Vedoucí DP: Ing. Luboš Běhálek – *TU v Liberci*  
prof. Dr. Ing. Petra Lenfeld - *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jindřich Doležal, Ph.D.,  
*A. Raymond Jablonec nad Nisou, s. r. o.*

### **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá analýzou konformního chlazení využívajícího k odvodu tepla ze vstřikovací formy cirkulující temperační medium v temperačních kanálech. Konformní chlazení je porovnáváno s konvenční temperací, kde temperační medium cirkuluje ve vrtaných kanálech. Hodnocení je provedeno s ohledem na rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku a změny krystalického podílu. Výsledky experimentálního měření byly porovnány s výsledky numerické simulace v programu Cadmould.

### **Abstract:**

This thesis deals with the analysis using a conformal cooling to remove heat from the injection mould with the circulating cooling medium in tempering channels. Conformal cooling is compared with the conventional cooling where cooling medium circulates in the drilled channels. The evaluation is proceed with respect to distribution fields of temperature on the surface of product and change in the degree of crystallinity. The results of experimental measurements were compared with results of numerical simulation in Cadmound software.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 28. května 2010

.....  
Petra Červinková  
Kamenice 12  
294 04 Dolní Bousov

### **Poděkování:**

Mé poděkování náleží především mým rodičům, kteří mi svojí podporou ve všech ohledech umožnili studium na TU v Liberci.

Dále bych chtěla poděkovat členům KSP na oddělení tváření kovů a plastů, jmenovitě prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi a Ing. Jindřich Doležal, Ph.D. z firmy A. Raymond Jablonec nad Nisou, s. r. o. za cenné rady a všestrannou pomoc.

Zvláštní poděkování patří Ing. Luboši Běhálkovi za jeho dohled a všechen čas nad řešením a zpracováním této diplomové práce.

## **OBSAH**

<b>1 ÚVOD</b>	<b>10</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>12</b>
2.1 Význam temperace vstřikovacích forem	15
2.2 Konstrukční zásady volby temperačních kanálů	19
2.3 Zvýšení intenzity odvodu tepla ze vstřikovací formy	22
2.4 Temperační způsoby	25
2.4.1 Temperace kapalným CO <sub>2</sub> – technologie Toolvac	25
2.4.2 Ranque – Hilsch vírová trubice	26
2.4.3 Tepelná trubice	28
2.4.4 Tepelné vložky	31
2.5 Konformní temperace	33
2.5.1 Direct Metal Laser Sintering – DMLS	37
2.5.2 Materiály forem s konformní temperací	39
2.5.3 Konformní temperace v praktických aplikacích	41
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>45</b>
3.1 Charakteristika nástroje a stroje	45
3.2 Charakteristika polymerních materiálů	49
3.3 Termovizní měření teplotních polí výstřiků	50
3.3.1 Záznam teplotních polí termokamerou ThermoCAM P65	51
3.4 Měření stupně krystalinity metodou DSC	55
3.4.1 Výroba zkušebních vzorků	55
3.4.2 Hodnocení stupně krystalinity	56
3.5 Simulační analýza softwarem Cadmould 3D-F	67
3.5.1 Postup simulace Cadmould 3D-F	67
<b>4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE</b>	<b>82</b>
4.1 Vyhodnocení teplotních polí na výstřiku	82
4.2 Vyhodnocení stupně krystalinity	85
4.3 Vyhodnocení simulační analýzy	87
<b>5 ZÁVĚR</b>	<b>92</b>
<b>LITERATURA</b>	<b>94</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ABS		akrylonitril-butadien-styren
PA		polyamid
PE		polyetylen
PET		polyethylentereftalát
PP		polypropylen
PS		polystyrén
PVC		polyvinylchlorid
$T_m$	[°C]	teplota tání
$T_c$	[°C]	teplota krystalizace
$T_g$	[°C]	teplota zesklňování
$T_{I,II,III}$	[°C]	teplotní pásma tavící komory č.: 1, 2, 3
$T_{tryska}$	[°C]	teplota trysky
$T_{tm}$	[°C]	teplota temperačního média
$T_{tms}$	[K]	střední teplota temperačního média
$T_{tmvz}$	[K]	střední teplota temperačního média na výstupu z dílčího temperačního okruhu
$T_{tmvs}$	[K]	střední teplota temperačního média na vstupu do okruhu
$T_F$	[K]	střední teplota povrchu tvarové dutiny formy
$T$	[K]	absolutní teplota tělesa
$t_v$	[s]	doba vstřikování
$t_d$	[s]	doba dotlaku
$t_{ch}$	[s]	doba chlazení po plastikaci materiálu
$t_c$	[s]	celková doba vstřikovacího cyklu
$p_{stř}$	[MPa]	vstřikovací tlak
$p_d$	[MPa]	dotlak
$v_{stř}$	[cm/s]	vstřikovací rychlost
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti v tahu
$E_t$	[MPa]	modul pružnosti v tahu
$\Delta H_m$	[J/g]	entalpie tání měřeného vzorku
$\Delta H_c$	[J/g]	entalpie krystalizace
$\Delta H_t^*$	[J/g]	entalpie tání plně krystalického polymeru

$x_{cm}$	[%]	stupeň krystalinity
$\dot{Q}_{tm}$	[W]	celkový tepelný tok mezi formou a temperačním systémem
$k_{f-tm}$	[W/m <sup>2</sup> .K]	součinitel prostupu tepla mezi povrchem dutiny formy a temperačním médiem
$\lambda_f$	[W/mK]	součinitel tepelné vodivosti materiálu formy
$\delta_f$	[m]	tloušťka stěny formy mezi tvarovou dutinou a temperačním kanálem
$\alpha_{tm}$	[W/m <sup>2</sup> K]	součinitel přestupu tepla temperačního média
$S_{tk}$	[m <sup>2</sup> ]	teplosměnná plocha temperačního kanálu
$W$	[W/cm <sup>2</sup> ]	radiační tok jednotkou plochy
$\delta$	[W/cm <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]	Stephan-Boltzmannova konstanta
$\varepsilon$	[-]	emisivita (jednota pro černé těleso)
$l$	[mm]	délka měděné tyče či tepelné trubice
$s$		tloušťka stěny výstřiku
$c$		vzdálenost osy temperačního kanálu od stěny tvarové dutiny formy
$b$		meziosová vzdálenost temperačních kanálů
$d_k$		průměr temperačního kanálu
Al		hliník
Be		beryllium
C		uhlík
Cd		kadmium
Co		kobalt
CO <sub>2</sub>		oxid uhličitý
Cr		chrom
Cu		měď
K		draslík
Mo		molybden
Ti		titan
V		vanad
Zn		zinek



DMLS	direct metal laser sintering
GIT	technologie vstřikování s následným přívodem plynu
DSC	diferenční kompenzační (snímací) kalorimetrie

# 1 ÚVOD

Polymerní materiály zaujímají v současné době zvláště díky svým charakteristickým vlastnostem zásadní postavení nosného konstrukčního materiálu používaného především v technických aplikacích. Mnohé výrobky jsou často vystavovány velkému mechanickému a tepelnému namáhání a jsou tak na ně kladeny vysoké nároky v oblasti výsledné kvality (rozměrové a tvarové přesnosti, požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností, vzhledových vlastností a minimálních deformací). Při nejčastějším způsobu zpracování polymerních materiálů vstřikováním je kvalita výrobku ovlivňována přímo či nepřímo řadou faktorů, které nikdy nepůsobí samostatně, ale vždy dochází k jejich vzájemné kombinaci. Především je to konstrukce nástroje, tvar výstřiku, volba polymerního materiálu (včetně přísad a plniv), předvýrobní operace (sušení, granulace, atd.), způsob zpracování, technologické podmínky vstřikování, volba stroje, atd. [1].

Jedním z těchto faktorů je také volba, uspořádání a dimenzování **temperačního systému vstřikovací formy** (volba temperačního media, intenzita odvodu tepla, aj.). Temperace má značný vliv na vlastnosti výstřiku, na požadovanou kvalitu a v neposlední řadě i na dosažitelnou dobu vstřikovacího procesu [1]. V dnešní době je známá celá řada temperačních metod podle provedení a účinnosti, avšak při jejich použití existují jistá omezení, která jsou dána geometrií (konstrukcí) vstřikovaného dílu, způsobem jeho zaformování ve vstřikovací formě, návrhem vtokového i vyhazovacího systému vstřikovací formy, ale také ekonomickými aspekty souvisejícími s návrhem vstřikovací formy, apod. [2].

Tato diplomová práce se zaměřuje na jeden ze způsobů temperace - **konformní chlazení**, které oproti ostatním temperačním metodám nabízí téměř neomezené konstrukční možnosti temperačních kanálů v libovolné vzdálenosti od dutiny formy. Tímto způsobem temperace lze dosáhnout vyšší míry homogenity odvodu tepla z dutiny formy, neexistuje zde takřka žádné omezení pro jeho aplikaci a nabízí mnohem lepší podmínky pro proces výroby dílů i pro samotnou výrobu temperačního systému. Konformní chlazení tak přináší řešení, kdy lze dosáhnout požadované kvality výrobků se

současným zkrácením celkové doby cyklu výroby a tedy i se snížením nákladů výrobního procesu.

Cílem diplomové práce, která doplňuje studie temperačních systémů řešené na katedře strojírenské technologie při aplikaci cirkulující vody v temperačních kanálech, tepelné trubice, kapalného CO<sub>2</sub> nebo stlačeného vzduchu, je seznámit čtenáře s relativně novým pojmem v oblasti temperačních systémů vstřikovací formy a zhodnotit konformní chlazení na zvolené vstřikovací formě s klasickým způsobem využívajícím cirkulující vodu v temperačních kanálech z hlediska rozložení teplotních polí na výstřiku termovizním měřením a změny stupně krystalinity pomocí metody DSC. Výsledky experimentálního měření byly porovnány s výsledky numerické simulace programem Cadmould, pomocí něhož byl také posuzován vliv konformního temperačního způsobu na vznik deformací. Experimentální měření bylo provedeno ve spolupráci TU v Liberci s firmou A. Raymond Jablonec s.r.o.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

Nejrozšířenější technologií na zpracování polymerních materiálů je především díky široké řadě zpracovávaných materiálů, možnosti vyrábět složité díly, krátkému cyklu a konstrukční flexibilitě – technologie vstřikování [3]. Jedná se o diskontinuální, cyklický proces, při kterém je polymerní materiál ve formě granulátu roztaven v tavicí komoře (za současného působení topného systému a tření materiálu o šnek) a následně účinkem vstřikovacího tlaku rychle dopraven přes trysku do uzavřené tvarové dutiny vstřikovacího nástroje - formy. V průběhu plnění tvarové dutiny předává tavenina teplo formě a vlivem ochlazování získává budoucí výstřik svůj konečný tvar. Po ochlazení výstřiku na teplotu vyjímání je výstřik společně s vtokovou soustavou vyhazovacím systémem z formy vyhozen. Tento postup vstřikovacího cyklu se opakuje [1].

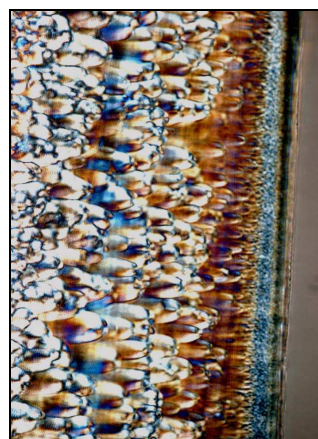
Při vstřikování dochází ke složitým tepelným, mechanickým a fyzikálním dějům, které navzájem ovlivňují výrobní proces, a tedy i vlastnosti a kvalitu konečného výrobku. Během chlazení výstřiku dochází k přenosu tepla z taveniny do formy, přičemž je toto teplo následně odváděno z formy temperačním systémem. Způsob rozložení teplotních polí na ploše výstřiku, rychlost odvodu tepla a skutečnost, že se chlazení podílí cca. jednou třetinou na době vstřikovacího cyklu, má z hlediska temperace forem významný vliv především na ekonomickou efektivnost výroby, kvalitu, konečnou strukturu výstřiku a s ní spojené jeho mechanické a fyzikální vlastnosti [2]. Vzhledem k výše zmíněným vlivům je žádoucí, aby teplotní pole výstřiku bylo co nejvíce homogenní a to po celé jeho ploše a odvod tepla proběhl konstantní rychlostí, což lze ovlivnit vhodným typem a dimenzováním temperačního systému formy [4]. Vzhledem k tvarové náročnosti některých výstřiků, složitosti formy (vtokového systému, vyhazovacího systému, geometrii tvarových vložek apod., jenž omezují konstrukci a výrobu optimálního temperačního systému) a změnám její teploty v průběhu procesu vstřikování, není možné se nehomogenitě teplotního pole výstřiku při odvodu tepla zcela vyhnout, avšak je třeba tuto míru nehomogenity co nejvíce

minimalizovat [2]. Teplota formy a s ní související intenzita temperace má během vstřikování značný vliv především na tyto činitele:

- **Stupeň krystalinity** –podíl krystalické fáze ve výstřiku. Čím větší je rychlost odvodu tepla, tedy nižší teplota formy, tím menší je objem krystalické fáze. Současně dochází ke vzniku většího množství krystalizačních zárodků, avšak vlivem krátké doby chladnutí na nich nestačí narůst sférolity (krystalické útvary) - vzniká tak „jemnozrnná“ struktura, a naopak. Jelikož nejsou během procesu chladnutí taveniny v dutině formy stejné tepelné poměry ve všech místech výstřiku, dochází ke vzniku různých morfologických vrstev po průřezu (skin - core struktura), viz obr. 2.1 [5].



Struktura PE,  $T_{tm} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $t_s = 2\text{mm}$   
zvětšení (50x)



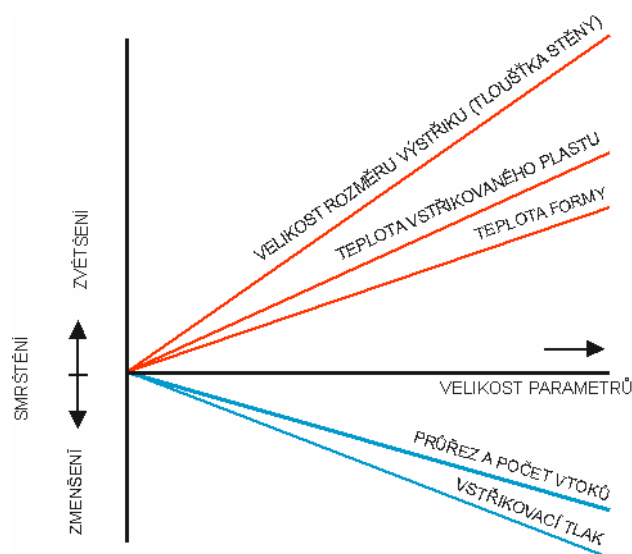
Struktura PE,  $T_{tm} = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $t_s = 2\text{mm}$   
zvětšení (50x)

Obr. 2.1: Vliv teploty temperace na strukturu materiálu [6]

Povrchovou vrstvu tvoří, vlivem kontaktu taveniny s ochlazovanou stěnou formy, velké množství krystalizačních zárodků bez nárůstu sférolitů. V této vrstvě lze pozorovat nevýraznou strukturu, která bývá mnohdy nesprávně označována amorfni vrstvou [7]. V přechodové vrstvě je intenzita odvodu tepla nižší směrem k jádru a rychlejší směrem k povrchu výstřiku, jedná se o jakýsi přechod mezi strukturou povrchové vrstvy a jádra, v němž dochází k značné orientaci makromolekul v důsledku smykových sil působících na taveninu. Nejpomalejší odvod tepla probíhá v jádře výstřiku, což umožňuje vznik malého počtu zárodků a nárůst velkých sférolitů. Poměr jednotlivých vrstev textury výstřiku, stejně jako podíl krystalické fáze, tvar a velikost sférolitů, výrazně

ovlivňují výsledné vlastnosti vstřikovaných dílů (hustotu, tažnost, pevnost, kluzné vlastnosti, apod.) [8].

- **Orientaci makromolekul** – dochází k ní pouze u termoplastů. Během vstřikování taveniny vtokovým systémem se za působení smykových sil makromolekuly v podobě náhodně sbalených klubíček orientují ve směru toku a v této nerovnovážné poloze u stěny formy postupně tuhnou. Čím více jsou makromolekuly narovnané vedle sebe, tím vyšší je stupeň orientace (směr orientace určuje směr srovnání makromolekul). Vyšší teplota formy snižuje stupeň orientace makromolekul, jelikož tak mají makromolekuly delší čas na návrat do své původní polohy, a naopak. Výsledkem orientace makromolekul je anizotropie materiálu (různé vlastnosti v různých směrech) [3].
- **Vnitřní napětí** – vlivem ochlazování dochází v povrchové vrstvě k rychlejšímu odvodu tepla oproti jádru výstřiku. V různých částech výstřiku tak probíhá nerovnoměrné chladnutí, což vede po ztuhnutí ke vzniku tahového napětí v jádře a tlakového napětí u povrchové vrstvy. Vnitřní napětí tak má za následek předčasné porušení materiálu. Čím vyšší je teplota formy (temperace), tím se sníží vnitřní napětí, jelikož v důsledku delší doby chlazení má možnost relaxovat [3].
- **Smrštění** – dochází k němu v průběhu ochlazování a projevuje se změnou rozměru dílu vlivem stlačitelnosti a tepelné roztažnosti polymerů. Faktory ovlivňující smrštění výstřiků jsou uvedeny na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Vlivy vybraných činitelů na velikost smrštění [3]

Celkové smrštění se skládá z výrobního a dodatečného (je sledováno 16 až 24 hodin po výrobě). Čím nižší je teplota formy (současně vyšší rychlost chlazení), tím vzniká nižší výrobní smrštění, avšak následně narůstá dodatečné smrštění. Oproti tomu při vyšší teplotě formy roste výrobní smrštění, ale neobjevuje se téměř žádné dodatečné. Smrštění může mít za následek vznik propadlin, vnitřních dutin a rozměrové nepřesnosti [9].

- **Vzhled povrchu** – matnost či lesk výstřiku je zejména ovlivněn schopností povrchu rozptýlit dopadající světelné paprsky rovnoměrně a do všech různých směrů. Vyšší teplota formy umožňuje vznik lesklého povrchu a dochází tak k odraz většího počtu světelných paprsků do lidského oka. Oproti tomu při nižší teplotě formy vzniká matný povrch výstřiku [1].

Všechny děje probíhající při zpracování polymerních materiálů vstřikováním, včetně odvodu tepla při temperaci, které v konečném důsledku stanovují celkové vlastnosti a kvalitu výsledných dílů, jsou velmi provázané a působí navzájem. Je proto důležité definovat vlivy komplexně, tedy mimo teploty formy i vstřikovací rychlostí, tlakem, dotlakem, neboť i tyto parametry ovlivňují stupeň krystalinity, orientaci, vnitřní napětí, smrštění a vzhled povrchu výstřiku [1].

## 2.1 Význam temperace vstřikovacích forem

Temperace je proces, jenž zahrnuje ohřev (např. před zahajováním výroby) a ochlazování vstřikovací formy za pomoci temperačního media v průběhu vstřikování. Slouží k zajištění i udržení požadované (optimální) teploty v tvarové dutině a současně k odvodu tepla předávaného taveninou formě, aby bylo možné po ochlazování výstřik vyjmout (při každém cyklu předává tavenina teplo formě, která se tak ohřívá). Jelikož je vstřikování nepřetržitý způsob výroby dílů, je důležité zajistit pro následující cyklus výroby stejné podmínky a to včetně teploty formy. Jak již bylo popsáno v úvodu kap. 2, má temperace vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti, deformaci, konečnou kvalitu dílu, aj. Proto je důležité, aby odvod tepla



temperačním systémem byl co nejrovnoměrnější po celé ploše dutiny formy a vstřikovací cyklus byl současně ekonomicky přínosný.

Nejběžnějším temperačním systémem je soustava temperačních kanálů, jimiž proudí teplotnosné medium, které odvádí teplo z formy a umožňuje ovlivňovat i regulovat teplotní děje ve formě během fáze chlazení výstřiku. Temperační kanály jsou vrtané nebo frézované a vyrobený drsný vnitřní povrch kanálů umožňuje vznik turbulentního proudění, během něhož dochází k mnohem intenzivnějšímu přestupu tepla ze stěny kanálu do teplotnosného media, než je tomu u lamelárního proudění. Tvary kanálů se vyrábějí s průřezem kruhovým, čtvercovým či obdélníkovým [10]. V závislosti na složitosti dílu, způsobu zaformování, technologických a konstrukčních podmínkách se realizuje odvod tepla průtokem media temperačním okruhem (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3: Temperační okruh formy [11]

Temperační okruh se rozděluje minimálně na dva dílčí okruhy, kdy první odvádí teplo z pevné části formy a druhý z pohyblivé části formy. Každý okruh lze řešit samostatně a v případě složitého dílu je tak možné větším počtem temperačních okruhů zajistit časově rovnoměrný odvod tepla ze všech míst výstřiku [10]. Při konstrukci temperačních okruhů je třeba vždy dodržet následující zásady: vstup temperačního media je nutné směřovat do míst s nejvyšší teplotou (ústí vtoku), zapojení temperačních okruhů konstruovat paralelně (temperační medium tak vstupuje k jednotlivým tvarovým prvkům



dílu ve shodný okamžik) a pokud je vzdálenost mezi povrchem tvarové dutiny a osy temperačního kanálu velká, pak vzdálenost mezi osami kanálů musí být malá, a naopak [12]. Aby bylo dosaženo optimálního odvodu tepla temperačním systémem je zapotřebí respektovat nejen tyto konstrukční zásady temperačních okruhů, ale i ty, jenž se týkají konstrukce samotných temperačních kanálů, uvedené v kapitole 2.3.

V praxi je temperace vstřikovacího procesu zajišťována temperační a řídicí jednotkou včetně výše popsaných temperačních kanálů, cirkulujícího teplotního média, utěšňovacích a spojovacích prvků.

- **Temperační jednotka** (viz obr. 2.4) – je připojena ke vstřikovacímu stroji. Pomocí teplotního média dopravovaného čerpadlem do temperačních kanálů zahřívá vstřikovací formu na požadovanou teplotu, udržuje tuto teplotu konstantní (s mírnými výchyly) a po vstříknutí taveniny do tvarové dutiny odvádí teplo temperačním médiem z formy do kanalizace (otevřený oběh) či zpět do systému (uzavřený oběh). Dle použitého média se volí temperační jednotka na základě maximální teploty, topného a chladicího výkonu a výkonu čerpadla [13].



Obr. 2.4: Temperační jednotka [13]

- **Řídicí jednotka** – bývá součástí temperační jednotky, zajišťuje veškeré provozní funkce temperačního přístroje. Zabezpečuje průběh včetně signalizace, displej zobrazuje provozní stavy, apod. Musí zaručovat spolehlivou a bezpečnou regulaci, snadnou obsluhu [14].
- **Temperační medium** – svým působením umožňuje činnost formy v optimálních teplotních podmínkách. Používá se zde aktivní medium, tedy

voda, olej či roztoky glykolů (viz tab. 2.1), které odvádí teplo z taveniny přes vstřikovací formu.

Temperační media lze dělit podle způsobu odvodu tepla ze vstřikovací formy na aktivní a pasivní:

- **Aktivní media** – jsou zdrojem tepla přímo uvnitř formy. Teplo je jimi buď přiváděno nebo odváděno podle požadavků (kapaliny, el. tepelné zdroje, apod.). Nejběžnějším teplotonosným médiem je kapalina, která proudí uvnitř temperačních kanálů a měla by vykazovat dobré tepelné vlastnosti, teplotní stálost, vysokou životnost, a jelikož s účinností temperace souvisí i čistota povrchu temperačních kanálů, je důležité se vyvarovat vytváření nečistot a usazenin [10]. Základní charakteristika kapalin je znázorněna v tab. 2.1.

**Tab. 2.1.** Charakteristika aktivních temperačních medií [10]

Typ kapaliny	Výhody	Nevýhody
<b>Voda</b>	vysoký přestup tepla; nízká viskozita; nízká cena; ekologicky nezávadná	použitelná do 90°C <sup>*)</sup> ; vznik koroze <sup>**)</sup> ; usazování kamene
<b>Oleje</b>	možnost temperace i nad 100°C	zhoršený přestup tepla
<b>Roztoky glykolů</b>	omezení koroze; ucpávání systému	stárnutí; znečišťování prostředí

Pozn.: <sup>\*)</sup> v tlakových okruzích možno vodu použít i při vyšších teplotách

<sup>\*\*)</sup> lze potlačit upravením vody

- **Pasivní media** – tato media ovlivňují tepelný režim formy svými fyzikálními vlastnostmi, jedná se např. o tepelně vodivé materiály (viz kap. 2.4.4) a tepelnou trubici (viz kap. 2.4.3) [10].

V mnohých případech se však používají aktivní i pasivní temperační media ve vzájemné kombinaci.

- **Utěšňovací a propojovací prvky** - slouží proti úniku temperačního media do prostoru formy. Pro utěsnění nepohyblivých částí formy jsou to tzv. „O“ kroužky dle ČSN 029281 a pro pohyblivou část „O“ kroužky dle ČSN 029280. Kvalita těsnících kroužků je závislá na výši používané

temperační teploty (běžné kroužky do teploty 80°C). Vyrábějí se v širokém rozsahu, avšak maximálně do 250 mm. Mimo formu se temperační soustava propojuje přívodními hadicemi napojenými a utěsněnými na koncovkách různých tvarů. Po nasunutí na koncovky se zajišťují stahovací páskou, zděří či šroubovými spoji. Příklad použití propojovacích hadic dle teploty media je uvedeno v tab. 2.2 [10].

Tab. 2.2: Propojovací hadice dle teploty temperace [10]

Teplota temperačního media	Druh propojovací hadice
do 40°C	měkčené PVC, olejovzdorné pryže <sup>*)</sup>
60 - 120°C	nízkotlaké letecké hadice (ČSN 378221) se šroubovými spoji, <sup>**)</sup> s drátěným zinkovým opletem či bez opletu
nad 120°C	pancéřované hadice z fluorových kaučuků

Pozn.: <sup>\*)</sup> těsnost by měla vyhovovat do tlaku 1MPa

<sup>\*\*)</sup> těsnost by měla vyhovovat do tlaku 2MPa

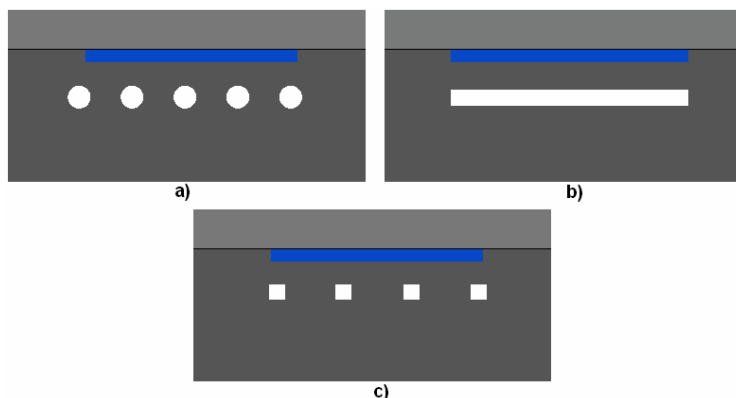
Všechny součásti rozvodu by měly mít protikorozi ochranu [10].

## 2.2 Konstrukční zásady volby temperačních kanálů

Jak již bylo zmíněno v kap. 2.1, temperační systém je tvořen nejčastěji soustavou kanálů s cirkulujícím teplotonosným mediem, jímž se odvádí teplo z formy. Při řešení temperačního systému s ohledem na optimální odvod tepla vychází konstruktér z celkového řešení formy, z podobnosti s předchozími návrhy forem, ze svých zkušeností, apod. [10]. I přes tyto faktory by měl konstruktér respektovat dané konstrukční zásady pro návrh temperačních kanálů:

- Zajistit průtok temperačního media tak, aby byla forma chlazena od nejteplejšího místa k nejchladnějšímu (využití největšího teplotního spádu). V případě ohřevu naopak.
- Kanály umístit v optimální vzdálenosti od stěny tvarové dutiny formy tak, aby byla současně zachována její dostatečná tuhost (dáno pevností i tuhostí materiálu formy a vstřikovacím tlakem) .

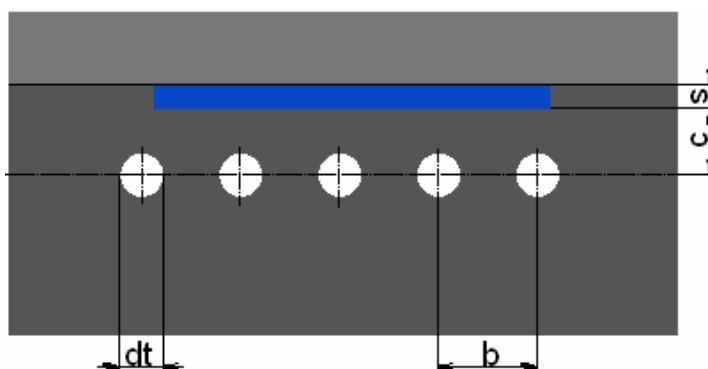
- Průřez kanálu volit z výrobních důvodů kruhový. Lze volit i jiný průřez: obdélníkový či čtvercový (viz obr.2.5).



Obr. 2.5: Průřezy vrtaných temperačních kanálů [10]

a) kruhový kanál, b) obdélníkový kanál, c) čtvercový kanál

- Umístit a dimenzovat kanály tak, aby bylo teplo intenzivně odváděno z míst styku proudu taveniny s formou. Jedná se zejména o místa v oblasti vtoku a trysky a jim protilehlá stěna.
- Volit umístění kanálů v závislosti na tloušťce stěny dílu (viz obr. 2.6) a to jak povrchu dutiny, tak také mezi sebou. Doporučované hodnoty vzdáleností jsou uvedeny v tab. 2.4.

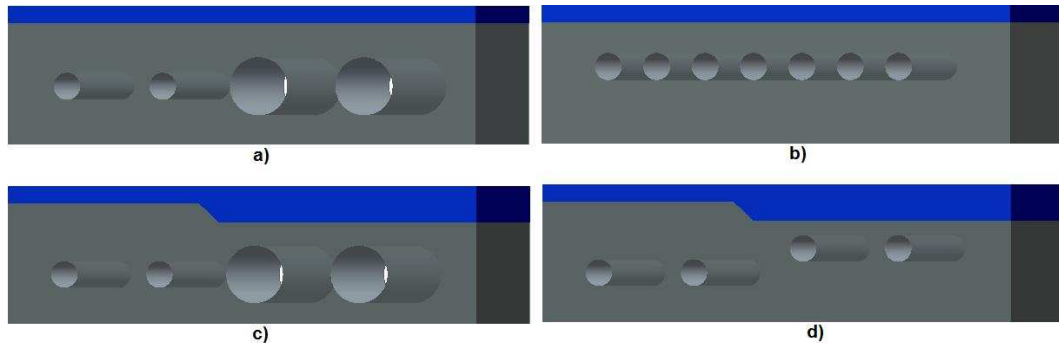


Obr.2.6: Volba temperačních kanálů v závislosti na výstřiku [10]

Tab. 2.3: Vzdálenosti temperačních kanálů dle tloušťky výstřiku [10]

Tloušťka stěny výstřiku s [mm]	c [mm]	b [mm]	dt [mm]
0-1	10 - 14	10 - 12	5 - 6
1-2	10 - 20	12 - 16	6 - 8
2-4	20 - 25	16 - 22	8 - 10
4-6	25 - 32	22 - 28	10 - 12
6-8	32 - 42	28 - 36	12 - 16
8-12	42 - 55	36 - 50	16 - 20

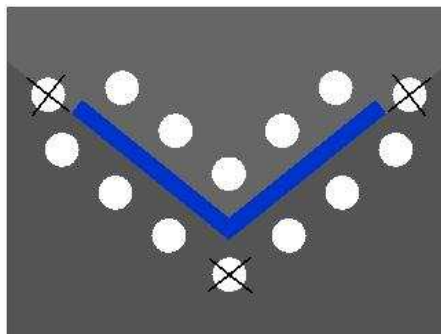
- Volit rozmístění kanálů s ohledem na tvar dílu a homogenitu teplotního pole na povrchu výstřiku. Je vhodnější navrhnout více kanálů s menším průměrem a menšími roztečemi, než naopak (viz obr. 2.7).



Obr.2.7: Vliv rozmístění temperačních kanálů [10]

- a), c) chybné rozvržení temperační kanály
- b), d) vhodné rozvržení temperační kanály

- Kanály se zpravidla neumísťují v blízkosti hran dílu (viz obr.2.8).



Obr. 2.8: Umístění temperačních kanálů u hran výstřiku [10]

- Průměr kanálů by neměl být větší než 6 mm, aby nedocházelo k ucpávání kanálů vodním kamenem, nečistotami, apod. Tomuto lze zabránit pravidelným čištěním, pasivací stěn kanálů, kanály z nerezavějících materiálů, čistitelným filtrem.
- V cestě temperačního media by se neměly vytvářet mrtvé kouty (usazují se v nich nečistoty, dochází k jejich korozi a snížení účinnosti odvodu tepla z formy.).
- Kanály konstruovat tak, aby bylo možné jednotlivé okruhy a větve propojovat hadicemi flexibilním způsobem [10].

Před začátkem výroby polymerního dílu je v dnešní době téměř běžné ve všech firmách provádět kontrolu návrhu formy a případně optimalizovat

vstřikovací cyklus pomocí simulačních procesů. Výsledky simulační analýzy představují pouze teoretické řešení konstrukčního návrhu formy, ale i přesto umožňují konstruktérovi zjistit, zda návrh i při respektování výše uvedených zásad splňuje požadavek na rovnoměrný odvod tepla z výstřiku, čímž se minimalizují jeho deformace, vnitřní napětí, apod. [15].

### 2.3 Zvýšení intenzity odvodu tepla ze vstřikovací formy

V průběhu procesu zpracování polymerního materiálu funguje vstřikovací forma jako výměník tepla s uzavřeným termodynamickým obvodem. Teplo je do tohoto obvodu přiváděno v podobě vstříknuté taveniny a odváděno z formy temperačním systémem, tepelnými ztrátami do okolí a vyhozením výstřiku [12]. Mezi povrchem tvarové dutiny formy a povrchem temperačních kanálů probíhá výměna tepla mechanismem vedení, avšak vzhledem ke konstrukční složitosti formy (tvarových částí z různých materiálů), neprobíhá tento přenos tepla v prostředí s konstantním součinitelem tepelné vodivosti (konstrukční části formy mají různé tloušťky a tepelné vodivosti). Po přestupu tepla na povrch temperačních kanálů je teplo odváděno do temperačního media mechanismem vedení a proudění. Celkový tepelný tok mezi formou a temperačním systémem je dán vztahem (2.1):

$$\dot{Q}_{tm} = k_{f-tm} \cdot S_{tk} \cdot (\bar{T}_F - T_{tms}) \text{ [W]} \quad (2.1)$$

$$T_{tms} = \frac{T_{tmvy} + T_{tmvs}}{2} \text{ [K]} \quad (2.2)$$

kde:

$k_{f-tm}$  ... součinitel prostupu tepla mezi povrchem dutiny formy a temperačním mediem [W/m<sup>2</sup>.K]

$$\frac{1}{k_{f-tm}} = \frac{\delta_f}{\lambda_f} \cdot \frac{1}{\alpha_{tm}} \Rightarrow k_{f-tm} = \frac{\lambda_f}{\delta_f} \cdot \alpha_{tm} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (2.3)$$

$\lambda_f$  ... součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [W/mK]

$\delta_f$  ... tloušťka stěny formy mezi tvarovou dutinou a temperačním kanálem [m]

- $\alpha_{tm}$  ... součinitel přestupu tepla temperačního media [ $W/m^2K$ ]  
 $S_{tk}$  ... teplosměnná plocha temperačního kanálu [ $m^2$ ]  
 $T_F$  ... střední teplota povrchu tvarové dutiny formy [K]  
 $T_{tms}$  ... střední teplota temperačního media [K]  
 $T_{tmvz}$  ... střední teplota temperačního media na výstupu z dílčího temperačního okruhu [K]  
 $T_{tmvs}$  ... střední teplota temperačního media na vstupu do okruhu [K]

Ze vztahu (2.1) je patrné, že k intenzifikaci odvodu tepla z dutiny formy pomocí temperačního media lze použít tyto čtyři způsoby:

- Zvětšení rozdílu teploty formy a temperačního media, přičemž tento způsob (snížení teploty formy) má za následek nežádoucí změnu kvality výstřiku, tj. nárůst vnitřního napětí, deformace, snížení stupně krystalinity, zhoršení mechanických vlastností výstřiku, apod. Tato varianta tedy nenabízí příliš velké možnosti ke zvýšení intenzity temperace.
- Použití konstrukčních částí formy nebo také temperačního media a prostředku s vyšším součinitelem tepelné vodivosti. Přehled tepelných vodivostí vybraných konstrukčních materiálů forem či temperačních medií je uveden v tab. 2. 4 a tab. 2. 5.

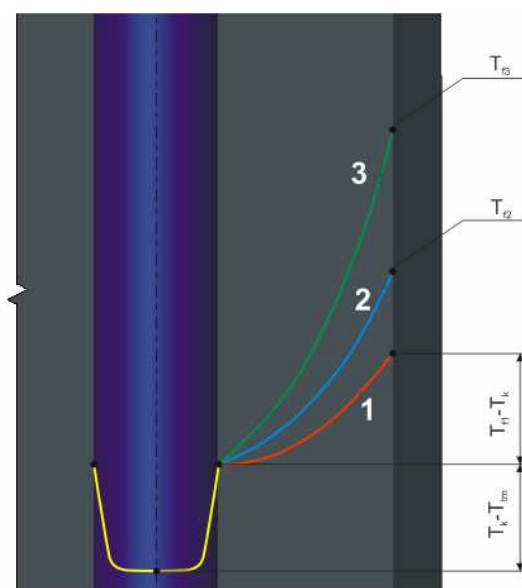
Tab. 2.4: Součinitelé tepelné vodivosti materiálů formy [12]

Konstrukční materiál formy	Součinitel tepelná vodivosti [ $W/mK$ ]	Poznámky
Uhlíková ocel	50	při obsahu C 0,15% až 0,35%
Slitinová ocel	15-52	dle podílu legur
Měď	394	
Bronz	48-84	dle složení
Měděné slitiny Ampcoloy	106-360	v závislosti na pevnosti
Hliník	222	
Slitiny hliníku	117-167	dle složení

Tab. 2.5: Součinitelé tepelné vodivosti temperačních medií [12]

Temperační medium	Součinitel tepelná vodivosti [W/mK]	Rozmezí teplot [°C]
Voda	0,552-0,666	0 až 200
Etylenglykol	0,304-0,259	0 až 60
Transformátorový olej	0,123-0,119	40 až 100

Součinitelé tepelných vodivostí pro temperační media se navzájem liší jen nepatrně na rozdíl od materiálu forem, kde je tento rozdíl tepelné vodivosti významným faktorem. Při temperování ocelové formy se pohybuje její tepelná vodivost v rozmezí 15 až 60 W/m.K (v závislosti na podílu legur). Ocelová forma je tak špatným vodičem v porovnání se slitinami mědi (např. Ampcoloy) či dokonce s čistou mědí (viz obr. 2.9), která má součinitel tepelné vodivosti přibližně 394 W/m.K [12].



Obr.2.9: Průběh teplot v temperačním kanále a stěně formy [3]

1 – chromová ocel, 2 - ocel, 3 – měď

Z ekonomických důvodů se z vysoce tepelně vodivých materiálů nevyrábějí celé části formy, ale pouze její tvarové části, které tak ve většině případů doplňují aktivní temperační media a napomáhají tak zvyšovat intenzitu odvodu tepla ze vstřikovací formy.

- Na účinnost temperačního systému z hlediska tepelného toku má vliv velikost teplosměnné plochy temperačních kanálů. Čím větší je teplosměnná plocha, tím dochází k intenzivnějšímu odvodu tepla z



dutiny formy (využití technologie DMLS umožňuje navrhnout temperační systém s podstatně větší teplosměnnou plochou, než je tomu u klasických vrtaných temperačních kanálů) [12].

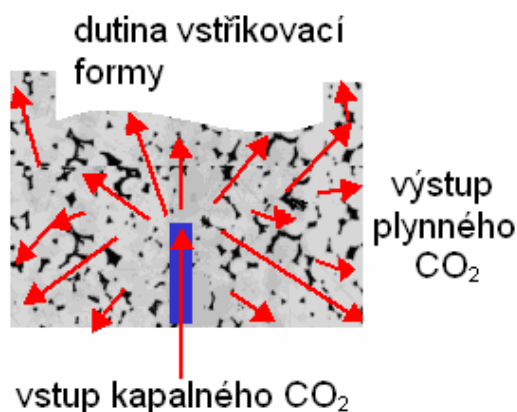
- Dosažení intenzivnějšího přestupu tepla ve vstřikovací formě lze zajistit i vyšší rychlostí temperačního media v temperačních kanálech, neboť rychlost průtoku media ovlivňuje (zvyšuje) hodnotu Reynoldsova čísla temperačního okruhu a tím také hodnotu součinitele přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a mediem [12].

## 2.4 Temperační způsoby

V současné době se pro odvod tepla z dlouhých, popřípadě úzkých tvárnků mimo temperačních kanálů s cirkulujícím teponosným mediem využívají i temperační způsoby, jenž jsou popsány v následujících kapitolách.

### 2.4.1 Temperace kapalným CO<sub>2</sub> – technologie Toolvac®

Technologii Toolvac vyvinula firma Foboha Werkzeugbau GmbH. ve spolupráci s firmou AGA Gas AB. Je to intenzivní způsob temperace spojením porézního materiálu formy a kapalného CO<sub>2</sub>. Princip odvodu tepla je založen na odpařování kapalného oxidu uhličitého vlivem poklesu tlaku [16]. CO<sub>2</sub> je přiváděn kompresorem ze zásobníku do mikroporézní ocelové vstřikovací formy, popřípadě do expanzního prostoru formy, v určitých časových intervalech (dle požadované teploty) a plyn v dutině formy následně expanduje, u mikroporézní oceli současně proniká póry (viz obr. 2.10).



Obr. 2.10: Pohyb kapalného CO<sub>2</sub> v mikroporézní ocelové formě [17]

Vzniká tak výparné teplo, které umožňuje intenzivní odvod tepla z výstřiku. Při temperaci kapalným  $\text{CO}_2$  konvenčních forem není odvod plynu stěnou možný, proto k přenosu tepla slouží povrch stěn dutiny formy (teplosměnná plocha).

Časový interval dávkování  $\text{CO}_2$  do dutiny formy slouží k zajištění požadované teploty a intenzita temperace tedy závisí na frekvenci těchto intervalů. Z hlediska lepšího odvodu tepla z formy je vhodnější poměrně vysoká dávka  $\text{CO}_2$  v krátkém časovém intervalu, než naopak.

V porovnání s běžnými vrtanými temperačními kanály lze metodou Toolvac dosáhnout snížení doby chlazení dle praktických výsledků až o 40% [16], avšak tato hodnota je výrazně závislá na tvarovém řešení výstřiku. Výhodou této temperační metody je i rovnoměrné teplotní pole na výstřiku, intenzivní temperace tlustostěnných částí, zvýšení produktivity práce, flexibilní rozmístění trubiček pro přívod  $\text{CO}_2$  či v neposlední řadě umožňuje pórovitý materiál odvodu vzduchu forem. Vhodným uplatněním Toolvac metody je temperace v tlustostěnné části vstřikovaného dílu GIT technologií.

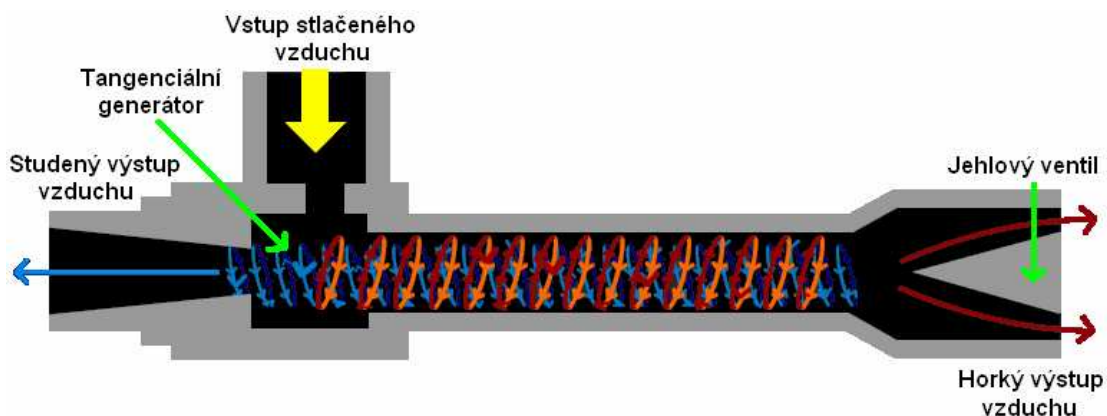
Naopak nevýhodou tohoto temperačního způsobu mohou být např. vysoké požadavky na zajištění čistoty při montáži nástroje nebo únik  $\text{CO}_2$  do okolí při otevření chladicího okruhu. Pokud je požadován lesklý povrch výstřiku, zajišťuje se dodatečnými operacemi, jelikož struktura mikroporézní tvarové dutiny formy neumožňuje dosáhnout dokonale lesklého povrchu výstřiku [16].

#### **2.4.2 Ranque-Hilsch vírová trubice**

Temperace vstřikovací formy za pomoci vírové trubice (viz obr. 2.11) je založena na využití stlačeného vzduchu jako zdroje síly. Bezesporu se řadí mezi nestandardní temperační metodu, kterou při experimentální činnosti s vývěvou zcela náhodně objevil Georges Joseph Ranque. Princip vírové trubice není ani dnes zcela jednoznačný.

Dle všeobecně uznávané teorie vstupuje do tangenciálně vrtaného generátoru (poblíž studené trysky) stlačený vzduch, jenž je přiváděn kompresorem z tlakové nádoby či z centrální sítě. Stlačený vzduch uvnitř trubice expanduje, zvyšuje svojí rychlost a v důsledku odstředivých sil je

nucen rotovat trubici podél vnitřní stěny směrem k horké výstupní trysce (rychlost rotace vzduchu zde dosahuje až 1 000 000 ot/min). Během rotačního pohybu se vlivem tření vzduch ohřívá, především v blízkosti stěny trubice, a horký proud vzduchu následně vystupuje přes jehlový ventil z trubice (teplota horkého proudu je větší než teplota stlačeného vzduchu na vstupu). Studený proud vzduchu je tlačěn ke středu vírové trubice, kde předáváním tepla vnějšímu horkému proudu vzduchu rotuje pomaleji, a následně vystupuje studenou tryskou ven [16].



Obr. 2.11: Princip Ranque-Hilsch vírové trubice [18]

Ventilem umístěným na horké výstupní trysce lze řídit množství a teplotu studeného i teplého vzduchu (intenzitu temperace). Na účinnost vírové trubice má vliv i teplota vstupujícího vzduchu – čím vyšší je vstupní teplota, tím vyšší je i teplota na studeném konci trysky. Z hlediska funkce trubice lze místo stlačeného vzduchu přivádět i jiný plyn, aniž by tak došlo k její ztrátě.

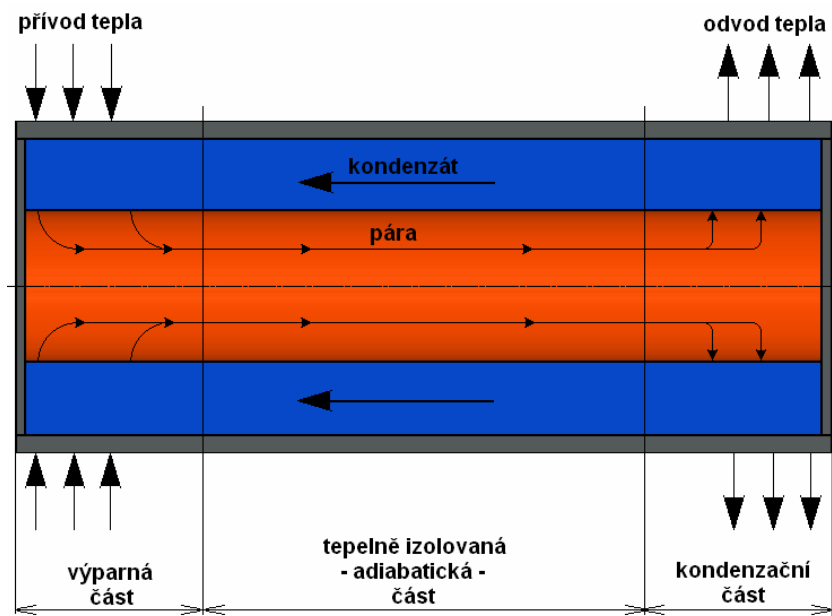
Oproti konvenčním temperačním způsobům nabízí vírová trubice řadu výhod – okamžitý náběh chlazení či ohřívání, při konstantní vstupní teplotě a tlaku lze udržet během provozu teploty studené či horké trysky ve velmi malé toleranci ( $\pm 0,56^{\circ}\text{C}$ ), ekologický provoz, jednoducho u údržbu, vysokou spolehlivost a v neposlední řadě i nízkou cenu [16]. Avšak vzhledem k vysokým otáčkám rotujícího vzduchu (až rychlosti zvuku) dochází při provozu k zvýšenému hluku. Tuto nevýhodu je možné eliminovat namontováním tlumiče na studený konec trysky [16]. Během praktického porovnávání konvenčního temperačního způsobu a vírové trubice, nebyly

výše uvedené teoretické výhody potvrzeny, což dokládá řešerše [19], jenž vznikla na základě vědecko-výzkumné činnosti katedry strojírenské technologie TU v Liberci.

Vírová trubice je využívána např. při vyfukování palivových nádrží, chlazení tvářecích strojů, u ultrazvukového svařování, při obrábění, při broušení pryže, pro vysoušení plynů, ve sklárnách, apod. [18]

### 2.4.3 Tepelná trubice

Tepelná trubice (viz obr. 2. 12) svými fyzikálními vlastnostmi ovlivňuje, na základě fázové přeměny teplonosného media uzavřeného v trubici, tepelný režim formy (pasivní temperace) a umožňuje tak intenzivní přenos tepla z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s nižší teplotou [3].

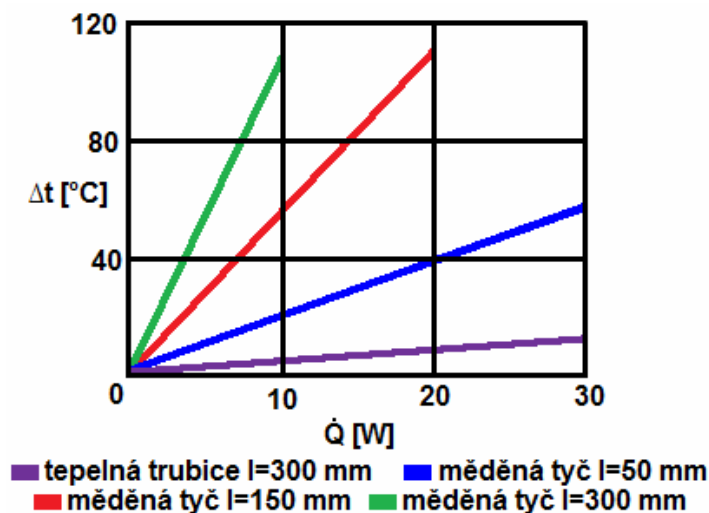


Obr. 2.12: Princip tepelné trubice

Tepelná trubice, nejčastěji kruhového průřezu, je částečně naplněna pracovním teplonosným mediem (vodou, etanolem, čpavkem, toluenem, aj.) a následně vakuově uzavřena. Přívodem tepla dochází k nepřetržitému vypařování media na vnitřní straně výparné části trubice a současně k odebrání značného tepla ze zdroje ohřevu (v případě vody až  $2,4 \cdot 10^6$  J/kg) [3]. Z výparné části proudí parní medium dále přes adiabatickou část do kondenzační části trubice, kde na vnitřní stěně páry kondenzují a odevzdávají tak latentní výparné teplo prostředí (za předpokladu plynulého

vratného toku kondenzátu zpět do výparné části). Tento proces se po dobu temperace stále opakuje. Proudění media mezi výparnou a kondenzační částí trubice může probíhat kapilárními, odstředivými či gravitačními silami [3].

Intenzita odvodu tepla tepelnou trubicí se liší v závislosti na kombinaci použitého media (voda, čpavek, apod.) a materiálu pláště trubice (měď, ocel, hliník, aj.) [3]. Na obr. 2.13 je porovnávána účinnost tepelné trubice a tyčí z mědi, z hlediska závislosti tepelného toku na rozdílu teplot temperačního media a stěny kanálu .



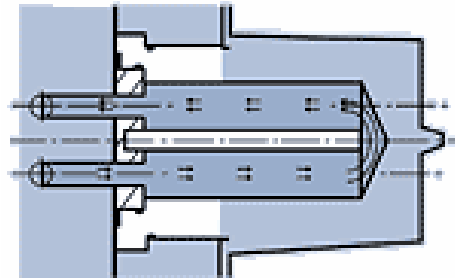
Obr.2.13: Porovnání účinnosti tepelné trubice a měděných tyčí

Pro názornost měděná tepelná trubice s vodním teponosným mediem může dosáhnout tepelné vodivosti až 5 000 W/mK, avšak tepelná vodivost samotné mědi je pouze 394 W/mK (viz tab. 2.5), z čehož je patrný již zmíněný vliv kombinace materiálu trubice s mediem [3].

Použitím tepelné trubice bylo v praxi dosaženo zkrácení pracovního cyklu až o 30% [3]. Její předností může být i malý průměr, který se pohybuje od 2 mm do 20 mm, a délka v rozmezí od 50 mm do 300 mm. Výhody tepelné trubice (krátká doba cyklu, nízké investiční náklady, aj.) lze podložit diplomovou prací [20], jejíž měření proběhlo na TU v Liberci.

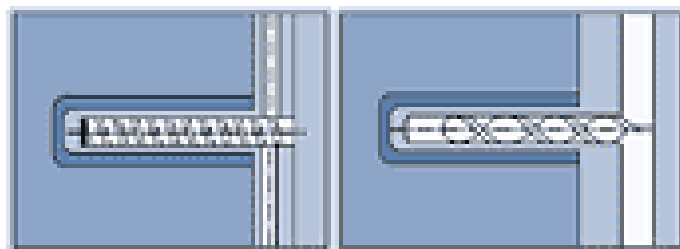
Aplikace tepelných trubic je vhodná zejména u dlouhých tvárnků a lze je používat nejen jako hlavního temperačního prostředku, ale též k lokální temperaci rozměrových a tvarově složitých částí výstřiků jako v případě **přepážkových temperačních systémů** (ploché, spirálové a fontánkové).

- **Plochá přepážka** rozděluje vedlejší temperační kanál, který je vyvrtaný kolmo k hlavnímu rozváděcímu kanálu, na dvě shodné části. Přepážka určí temperačnímu mediu nucený směr proudění z hlavního kanálu do vedlejšího. Medium proudí po jedné straně přepážky až k jejímu vrcholu, který obtéká a následně se vrací zpět do hlavního kanálu (viz obr. 2.14) [21].



Obr. 2.14: Temperance jader a dutin kanálem s plochou přepážkou [21]

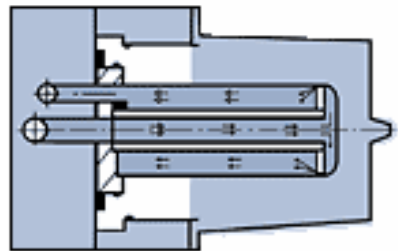
- Značnou výhodou plochých přepážek je především jednoduchost, což přispívá k jejich častému využívání pro temperování tepelně méně náročných výrobků. Avšak nepřesné umístění přepážky může mít za následek rozdílnou účinnost v obou částech rozděleného kanálu [21].
- **Systém spirálových přepážek** řeší odvod tepla z vrcholu vrtaného kanálu v jádře. Princip je totožný se systémem plochých přepážek. Přepážka v podobě spirály s velkým stoupáním rozděluje vedlejší kanál, přičemž je tak temperační medium nuceno proudit z hlavního rozváděcího kanálu jedním závitem do kanálu vedlejšího. Ve vrcholu kanálu mění medium svůj směr a vrací se tak druhým závitem zpět do hlavního kanálu. Na obr. 2.15 je znázorněno nejčastější provedení spirálových přepážek s jednou či dvěma spirálami [21].



Obr. 2.15: Temperance jader a dutin se spirálovou přepážkou [21]

Při odvodu tepla spirálovými přepážkami vzniká velmi homogenní rozložení teplotního pole okolo dutiny jádra. Používají se pro průměry dutin 12-50 mm (na základě doporučení výrobce by neměl být průměr vedlejšího kanálu menší než 12 mm) [3].

- **U fontánkového řešení** je místo přepážky umístěna tenká trubička zakončená osazením. Z hlavního rozváděcího kanálu proudí temperační medium do trubičky a následně k vrcholu vedlejšího kanálu. Odtud se vrací zpět v prostoru mezi vnější stěnou trubičky a vnitřní stěnou vedlejšího kanálu (viz obr. 2.16) [21].

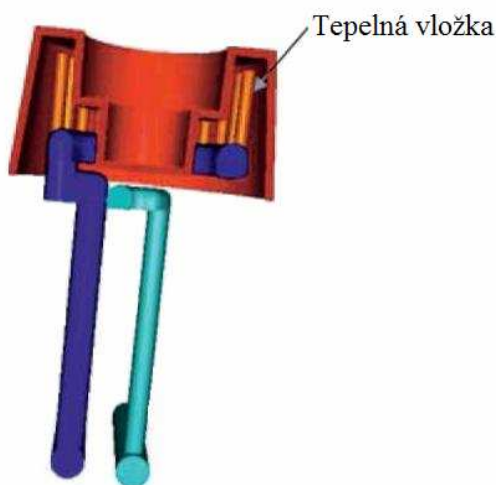


Obr. 2.16: Temperance dutin a jader „fontánkovým“ řešením [21]

#### 2.4.4 Tepelné vložky

Tepelné vložky (na bázi vysoce tepelně vodivých slitin Cu, Be, Co, apod.) jsou pasivním temperačním prostředkem, z čehož vyplývá, že nedochází přímo k odvodu tepla pomocí teplonosného media v temperačních kanálech vstřikovací formy [16]. Principem je využívání vysoce tepelně vodivého materiálu pro konstrukci tvarových vložek nebo jejich částí vymezující tvar výstřiku (viz obr. 2.17). Z ekonomického důvodu se z těchto materiálů nevyrábějí celé části forem, ale pouze jejich tvarové vložky.

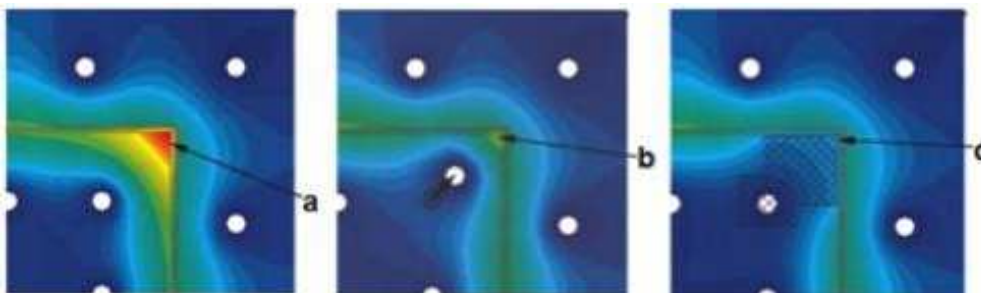
Vysoce tepelně vodivé materiály umožňují vhodně zajistit (zvýšit) odvod tepla z tvarových míst, kde se temperační kanály jen velmi obtížně konstruují. Ve většině případů vložky z vysoce tepelně vodivého materiálu pouze doplňují aktivní temperační systém (viz obr. 2.17) a zrovnoměňují odvod tepla z výstřiku [16].



Obr. 2.17: Temperace výstřiku pomocí tepelných vložek z mědi [22]



Tepelné vložky lze použít v různých místech vstřikovací formy (např. čelisti), v tepelně namáhaných oblastech a u většiny tvarově složitějších výstřiků, jenž se obtížně temperují, jako jsou vyztužená žebra, tenké výstupky či dlouhé tvárníky. Jejich umístěním poblíž tvarové dutiny formy se docílí zvýšení intenzity temperace ve formě a současně je zajištěno rovnoměrné teplotní zatížení formy i výstřiku v celém objemu [16]. Na obr. 2.18 je znázorněna změna teplotního pole na základě numerické simulace v porovnání s konvenčním způsobem odvodu tepla z výstřiku cirkulací teplotního média v temperačních kanálech.



Obr.2.18: Porovnání teplotních polí výstřiku při temperaci cirkulující vodou v temperačních kanálech [23]

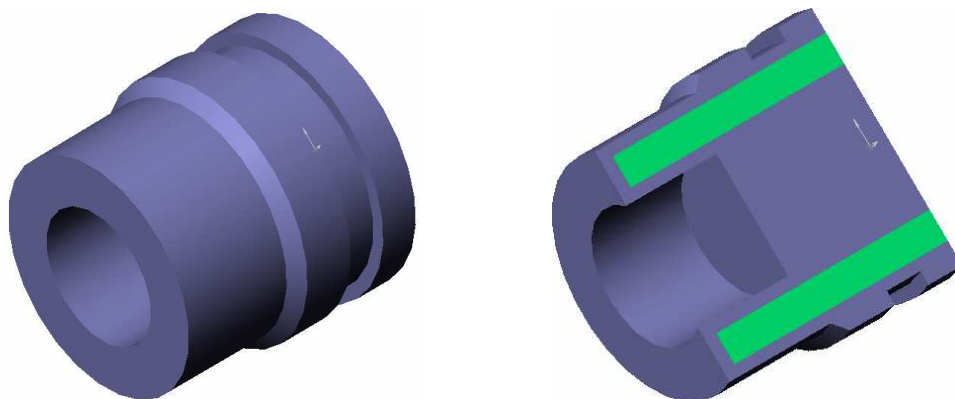
a – neoptimalizované řešení, b – optimalizovaný návrh temperačních kanálů,  
c – řešení kombinací temperačních kanálů a tepelné vložky ze slitiny Cu

Kromě tepelných vložek je možné zvýšit intenzitu temperace formy nástřiky z vysoce tepelně vodivých materiálů na povrch tvarové dutiny formy.

Mechanické vlastnosti těchto vrstev jsou nižší, než u nástrojové oceli, čímž dochází k jejich rychlému opotřebování, korozi či oxidaci [3]. V praxi je tato skutečnost řešena patentovanou technologií Mecobond, která spočívá ve vytvoření měděného jádra formy s ocelovým pláštěm. Vlivem vysoké vodivosti měděného jádra je umožněn intenzivní odvod tepla a zároveň ocelový plášť chrání jádro před opotřebováním (viz obr. 2.19) [24].

Na základě rešeršních poznatků [25] je možné konstatovat, že kombinací aktivního a pasivního temperačního prostředku lze dosáhnout rovnoměrnějšího teplotního rozložení na výstřiku a současně zvýšeného odvodu tepla z taveniny do stěn formy a temperačního systému, což potvrzují teoretické výhody tepelných vložek.



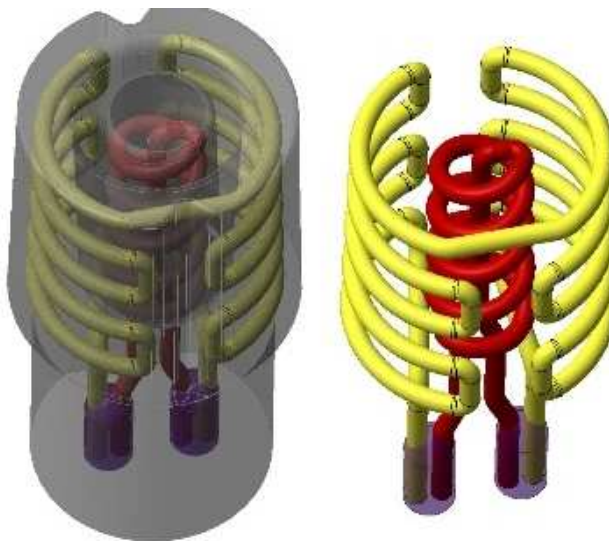


Obr. 2.19: Technologie Mecobond – jádro ocelové formy z mědi [24]

Výhodou tepelně vodivých materiálů je zkrácení celkové doby vstřikovacího cyklu, v řadě případů (jak dokazují výsledky z praxe) až o 25% [3].

## 2.5 Konformní temperace

Jak již bylo řečeno výše (viz kap.2) dochází během vstřikování ke složitým tepelným, mechanickým a fyzikálním dějům v nástroji, což není možné vždy dostatečně ošetřit konvenčními způsoby temperace [26]. Řešení nabízí konformní chlazení. Tímto typem temperačního způsobu lze nazvat systém, v němž se snaží temperační kanály kopírovat co nejpřesněji a v minimální vzdálenosti dutinu formy [27]. U konformního chlazení lze temperační okruh rozdělit na dílčí okruhy (viz obr. 2.20) v závislosti na složitosti dílu, obdobně jako u konvenčních temperačních kanálů.

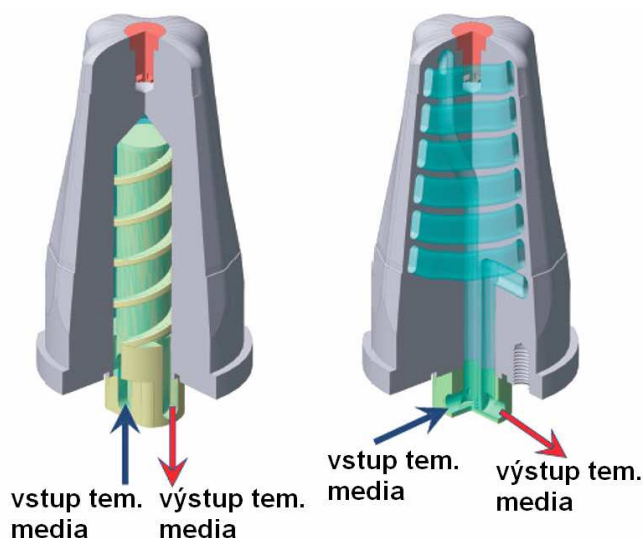


Obr.2.20: Konformní temperační okruhy [28]

Členění temperačního okruhu na dílčí okruhy je nezbytné především v případě velkoplošných a složitých dílů, jelikož dochází k vystavování formy rozdílným teplotám. V takovém případě má nehomogenní teplotní pole na výstřik negativní vliv z hlediska zhoršených vlastností a deformací (viz kap. 2) [22].

Při používání klasických vrtaných temperačních kanálů vyvstávají problémy s jejich přizpůsobením povrchu (obrysu) dutiny formy. Konvenční způsob výroby temperačních kanálů umožňuje sestavení temperačního systému ve formě kombinací vodorovných, svislých či šikmých temperačních kanálů, což mnohdy nepřispívá k celkové době vstřikovacího cyklu. Současně tak jsou komplikovány i možnosti optimalizace odvodu tepla z dutiny formy vlivem konstrukční složitosti vstřikovací formy, kdy konstruktér musí navrhnout temperační systém s ohledem na umístění vtokového systému, vyhazovačů, apod. [29].

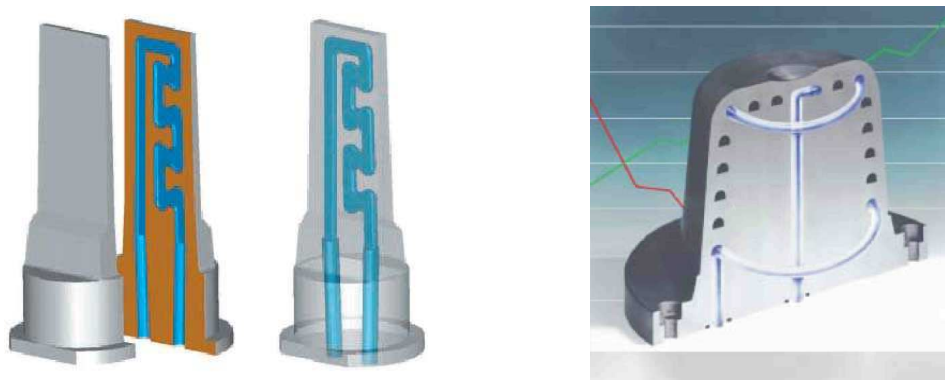
Řešením, které umožňuje odstranit všechny nedostatky konvenční temperace, je již výše zmíněný konformní systém temperace. Na obr. 2.21 je porovnání konstrukčního řešení temperace dutiny výstřiku konvenční temperací (kombinace temperačních kanálů a spirálové přepážky) a konformní temperace (vpravo).



Obr 2.21: Porovnání temperace výstřiku konvenčním a konformním způsobem [30]

Jak je z obr. 2.21 patrné, jsou temperační kanály konformního systému rozloženy rovnoměrněji, zasahují téměř k vrcholu a výrazně blíže ke stěně výstřiku, oproti konvenčnímu způsobu (spirálová přepážka).

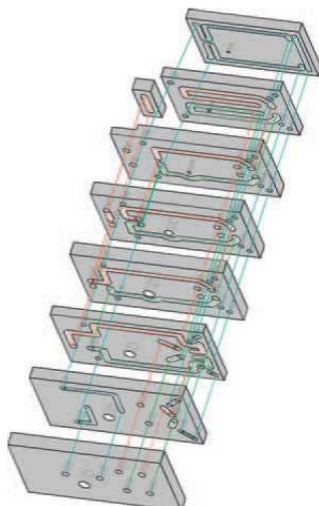
Nejstarším známým způsobem temperačního systému, který kopíruje obrys dutiny formy je systém **Contura** [22]. Vyvinula ho firma Innova Zug - Engineering GmbH. a jedná se o účinný temperační systém, kde temperační kanály sledují obrys dutiny vstřikovací formy (tvar budoucího výrobku), a umožňuje výrobu temperačních kanálů s různým průřezem (viz obr. 2.22) [3].



Obr. 2.22: Temperační systém Contura [26], [31]

Před samotným započítím výroby formy se vytvoří 3D model formy, který je pomocí počítače rozdělen na jednotlivé vrstvy. Následně jsou do stykových ploch konvenčním způsobem (frézováním, vrtáním, atd.) vytvářeny temperační kanály, které se mohou tímto způsobem výroby v celkovém pohledu lépe přiblížit obrysu tvarového jádra. Jednotlivé vrstvy jsou na závěr pospojovány pomocí vakuového pájení (viz obr. 2.23) tak, aby došlo ke vzniku vzduchotěsného spoje a tím přesné tvarové části vstřikovací formy [22].

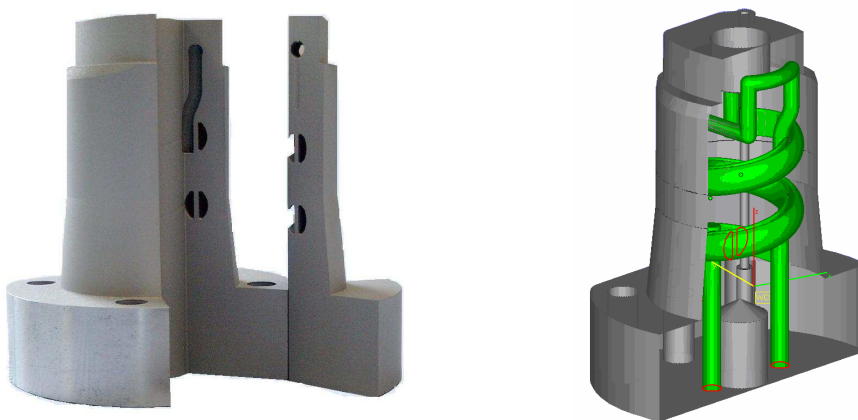
Pájené součásti jsou kovově lesklé, čisté a zároveň díky vakuu nedojde ke vzniku nadměrného množství plynů v pájce. Naopak dochází k odplynění spojovacího materiálu a tedy k zlepšení kvality spoje. V tomto případě probíhá pájení bez účasti tavidla, což umožňuje volit mnohem menší mezery ve spojích (0,01 až 0,1mm) a vlivem vysokého kapilárního tlaku pájky jsou mezery dokonale vyplněny pouze jejím materiálem. Spojovací materiál nesmí obsahovat prvky s vysokým odpařovacím tlakem při teplotách pájení (tj. Zn, Cd, K, atd.). Výhodné jsou však pájky z čistých kovů s vysokou teplotou tání či na bázi niklu a drahých kovů [3].



Obr. 2.23: Jednotlivé vrstvy formy s temperačním systémem Contura [22]

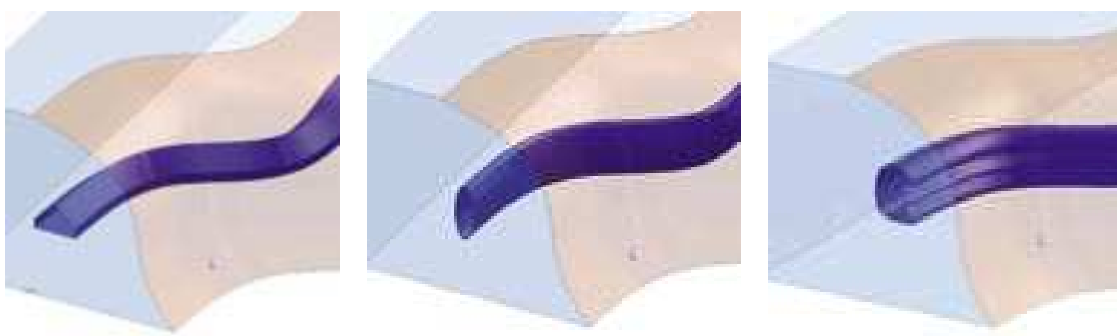
Předností temperačního systému Contura je především možnost flexibilního řešení tvaru temperačních kanálů a kritické oblasti v nástroji mohou být temperovány odděleně, z čehož vyplývá, že je možné takto řešit temperaci i mnohem složitějšího tvaru dutiny vstřikovací formy. Rychlým a rovnoměrným odvodem tepla z dutiny formy se nabízí snížení doby pracovního cyklu až o 30% v závislosti na konstrukčním řešení výstřiku [26]. Rozložení teplotního pole je dle rešeršních poznatků při tomto systému temperace vstřikovací formy podstatně rovnoměrnější, než je tomu u běžných temperačních kanálů s cirkulujícím teplotonosným médiem a to i přes provedení optimalizace velikosti průřezu a rozložení temperačních kanálů ve vstřikovací formě.

Spoluprací firmy Impetus a Contura MTC došlo ke zkombinování systému Contura a laserového slinování (viz obr. 2. 24).



Obr. 2.24: Temperační kanály vytvořené laserovým slinováním [32]

Tento nový patentovaný postup využívá a kombinuje výhody jak systému Contura (možnosti vytvářet temperační okruhy kopírující povrch dutiny formy), tak i laserového slinování. Oproti samotnému systému Contura, kde jsou temperační kanály vytvářeny konvenčními technologiemi, dochází zde vlivem laserového slinování k možnosti výroby temperačních kanálů téměř libovolné geometrie (viz obr. 2.25) a vzdálenosti od stěny formy, které by jinak byly konvenčními technologiemi těžko proveditelné [33].



Obr. 2.25: Možnosti tvarů konformních temperačních kanálů [34]

Všechny přínosy konformní temperace jsou podpořeny především systémem, jenž tyto temperační kanály umožňuje vytvářet. V případě kombinace s laserovým slinováním je to technologie Direct metal laser sintering (DMLS) [34].

### 2.5.1 Direct Metal Laser Sintering – DMLS

Pro výrobu temperačních kanálů konformní temperace technologií DMLS je nejefektivnější způsob výroby vložek forem v kombinaci polotovaru zhotoveného konvenčními technologiemi (poz. 1, obr. 2.26 f), na kterém se laserem vytvoří tvarová část s temperačními kanály (poz. 2, obr. 2.26 f). Tento způsob výroby temperačních kanálů je znázorněn na obr. 2.26. Kromě tohoto způsobu je však možné vytvořit konformní temperační kanály v samotných tvarových vložkách formy, které jsou společně s temperačním systémem zhotovovány metodou DMLS přímo z kovového prášku.



		
a - 3D data vložky s konformním chlazením	b - základní vložka vyrobená klasickou metodou	c - upevnění vložek na platformu
		
d - příprava dat ve výrobní stroji EOSINT M270	e - vyjímání hotových vložek s konformním chlazením	f - vložky s konformním chlazením

Obr.2.26: Postup technologie DMLS [35]

Princip DMLS spočívá v postupném tavení kovového prášku ve vrstvách vlivem laserového paprsku v pracovní komoře. Pro většinu materiálů je pracovní komora vyplněna dusíkem, který chrání díl proti oxidaci. Základem pro DMLS jsou 3D CAD data v příslušném zařízení (viz obr. 2.27), kde je počítačový model rozřezán na velmi tenké vrstvičky. Dávkovací zařízení nastaví množství prášku pro jednu vrstvu a rameno s keramickým břítem rozprostře na povrch ocelové základové desky kovový prášek podle tloušťky vrstvy. Následně dochází k tavení kovového prášku na základové desce pomocí laseru, avšak kovový prášek se taví pouze v konturách řezu, které jsou definovány v 3D CAD systému. Takto pokračuje postupné spojování kovového prášku do vrstev, včetně protavení k podkladové vrstvě až do finálního celku dílu [30].

Tloušťka vytvářených vrstev se pohybuje s ohledem na přesnost a rychlost výroby od 0,020 do 0,040 mm (tenčí vrstva znamená vyšší přesnost, ale za delší čas) [36]. Kovový prášek, který nebyl při slinování využit je získán zpět a z 98% použit v dalším výrobním procesu. Požadované tvrdosti dosáhne výrobek následným tepelným zpracováním.

Nezbytnou součástí DMLS procesu jsou též dokončovací operace (povrch lze tryskat, leštit, brousit či obrábět technologiemi jako běžný kovový materiál). V závislosti na složitosti a velikosti výrobku trvá proces výroby od několika hodin až po několik dnů [36].



Obr. 2.27: Zařízení EOSINT M270 [36]

Technologie DMLS nabízí z hlediska tvaru a rozmístění temperačních kanálů v nástroji téměř neomezené možnosti při návrhu a následné výrobě temperační soustavy [37]. Platí zde, že čím je výrobek složitější, tedy čím je četnější množství detailních prvků na výrobku, tím je hospodárnější výroba formy technologií DMLS [36]. Přičemž mechanické vlastnosti vyrobených kovových dílů jsou plně srovnatelné s díly vyráběnými konvenčními způsoby technologie obrábění.

V České republice patří k průkopníkům využívání technologie DMLS společnost Innomia a.s., která používá první zařízení svého druhu u nás - EOSINT M270 (viz obr. 2.27) [35].

### **2.5.2 Materiály forem s konformní temperací**

Pro technologii DMLS je výběr materiálů široký. V případě výroby formy s konformní temperací lze použít tři typy materiálů: bronz, nástrojovou ocel, martenzitickou ocel (viz tab. 2.6).

Tab. 2.6: Materiály pro technologii DMLS [35]

Název materiálu	Charakteristika materiálu	Specifické aplikace
Direct Metal 20	slitina bronzu	Vstřikovací formy, funkční prototypy
Direct Steel 20	nástrojová ocel	Vstřikovací formy, funkční prototypy
EOS Maraging Steel MS1	martenzitická ocel (DIN 1.2709)	Vstřikovací formy – sériové, vysoce namáhané strojní součásti
EOS Stainless Steel 17-4	korozivzdorná ocel (DIN 1.4542)	Prototypy a sériové díly, strojírenství, medicína
EOS Cobalt Chrome MP1	slitina CoCrMo	Prototypy a sériové díly, strojírenství, medicína, dental
EOS Titanium Ti64	slitina Ti6Al4V	Prototypy a sériové díly, letectví, motor sport, atd.
EOS Titanium TiCP	čistý titan	Prototypy a sériové díly, medicína, dental

**Direct Metal 20** – velmi jemný multikomponentní prášek na bázi bronzu. Výchozí díly mají dobré mechanické vlastnosti ( $R_m = 400$  MPa,  $E_t = 80$  GPa) s výborným rozlišením detailu a dobrou kvalitou povrchu [36]. Z dokončovacích operací je možné použít pro formy z tohoto materiálu tryskání či leštění. Direct Metal 20 je vhodný zejména pro výrobu prototypů či vstřikovacích forem.

**Direct Steel 20** – velmi jemný multikomponentní prášek na bázi oceli s vysokou pevností, tvrdostí a otěruvzdorností. Rychlost výroby je oproti bronzovému prášku podstatně nižší. Tento materiál se využívá stejně jako Direct Metal pro výrobu prototypů a vstřikovacích forem [36].

**Maraging Steel MS1** – martenzitická ocel je dnes nejpoužívanějším materiálem na výrobu sériových nástrojů a pro konformní formu má nejlepší výchozí vlastnosti. V níže uvedené tab. 2.7 jsou porovnány konečné mechanické vlastnosti i parametry vztahující se k laserovému tváření DMLS technologií. Díly vyrobené z tohoto materiálu mají homogenní strukturu, vysokou houževnatost a tvrdost od 36 do 39 HRC. Tepelným zpracováním lze zvýšit tvrdost dílů až na 50 až 54 HRC a mez pevnosti  $R_m = 1900$  MPa [36]. Tento materiál se běžně využívá pro výrobu jednotek do letectví a astronautiky, na strojní součástky a funkční díly či na výrobu nástrojů a stavebních jednotek pro vstřikování polymerních materiálů, tlakové lití, lisování či protlačování. Díky houževnatosti materiálu lze použít



martenzitickou ocel i pro výrobu forem na vstřikování polymerních materiálů s 50% skelných vláken [36].

Tab. 2.7: Základní vlastnosti a parametry vybraných materiálů [35]

Parametr	Direct Metal 20	Maraging Steel MS1
Min. tloušťka stěny [mm]	0,6	0,4
Rychlost stavby [mm <sup>3</sup> /s]	10-20	2-4
Zbytková porozita [%]	8	-
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	400	1100
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	200	1000
Modul pružnosti $E_t$ [GPa]	80	180
Tvrdość povrchu	120HV	36-39
Max. pracovní teplota [°C]	400	400

### 2.5.3 Konformní temperace v praktických aplikacích

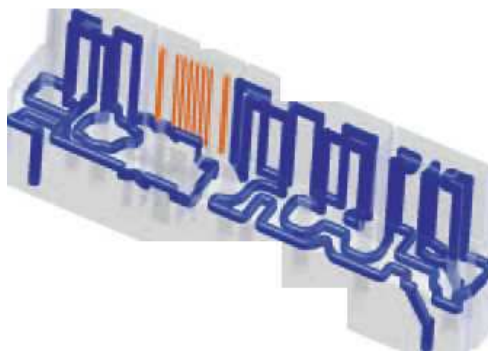
Jedním z praktických příkladů aplikace konformního chlazení je případ vstřikování dílu obložení B-sloupku Mercedesu Benz CLS třídy (viz obr. 2.28) [38]. Hlavním požadavkem při výrobě tohoto dílu byl dokonalý hladký optický vzhled bez poklesu kvality a bezpečnosti dílu. Základem pro dosažení dílu s vysokým leskem a bezchybným povrchem bylo použití 2-komponentní technologie a konformního systému temperace v kombinaci s tepelně vodivými vložkami. Umístění sloupku mezi předním a zadním bočním sklem přispívá k celkovému dojmu z boku automobilu (především u tmavě tónovaných skel). Proto bylo pro konstruktéry důležité mimo jiné zajistit nenarušený výrazně lesklý vzhled B-sloupku. Povrchové defekty, jako např. propadliny jsou tak velmi snadno rozpoznatelné. Při použití konvenčních temperačních kanálů se staly tyto problémy neřešitelné, a proto měla možnost společnost Contura MTC. navrhnout konformní temperační systém, doplněný tepelně vodivými segmenty, kde byly temperační kanály umístěny ve velkém počtu v minimální vzdálenosti od povrchu formy [38]. Díky této temperaci se výrazně zvětšila teplosměnná plocha a tím došlo k



Obr. 2.28: B-sloupek [38]

rovnoměrnému odvodu tepla i ze všech rizikových míst. Konformní temperací při výrobě B-sloupku se tak snížilo vnitřní napětí a byly odstraněny rozdíly v odrazových vlastnostech a stupni lesku povrchu. Relativně nízké pořizovací investice za výrobu formy s temperací Contura se v tomto případě vrátily za dobu kratší, než jeden rok [38].

V automobilovém průmyslu je celá řada dílů, při jejichž výrobě byl k temperaci zvolen konformní systém chlazení. Např. pro temperaci formy tvarové elektronické součástky z ABS viz obr. 2.29 (o rozměrech 300 x 50 x 100 mm) nebo pro výrobu nádrže na chladicí kapalinu [22]. Společně v kombinaci s tepelně vodivými segmenty se docílilo snížení deformací výrobku se současným zkrácením doby cyklu [22].



Obr. 2.29: Elektronická součástka [22]

Možnost zkrácení celkové doby výrobního cyklu je preferována především v obalové technice. Zde je krátký výrobní cyklus doslova nutností.



Obr. 2.30: Boční forma pro obalovou techniku [22]

Na obr. 2.30 je znázorněna boční forma pro tenkostěnný díl se dvěma nezávislými temperačními okruhy systému Contura, které umožňují regulovat teplotu stěny formy v rovinné i tvarové oblasti s homogenním teplotním

polem. Výsledkem v tomto případě byla velmi krátká doba cyklu, stabilní proces a vysoce kvalitní díly [22].

Rovněž při vyfukování PE lahví se lze při jejich chlazení setkat s konformním chlazením. Výrobní cyklus je zde limitován dobou chlazení hrdla lahve, jelikož v této oblasti má výrobek největší tloušťku stěny a doba chlazení hrdla je tak nejdelší. Vložky s konformním systémem temperace ve standardní formě výrazně zkrátí výrobní cyklus, při současném dodržení požadované kvality dílu [39].

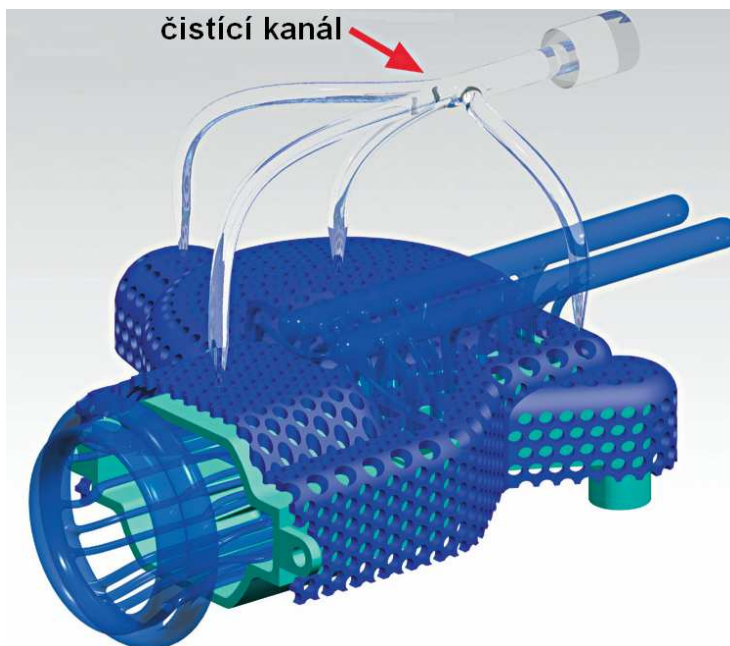
Dalším příkladem formy s konformním chlazením z praktických aplikací je vstřikovací forma pro výrobu golfových míčků (viz obr. 2.31). Konformní chlazení u této aplikace snížilo dobu chlazení a dobu cyklu o 20% a navíc doba pro zhotovení tvarových částí formy nepřesáhla 50 hodin [34].



Obr. 2.31: Tvar formy včetně temperačních kanálů na golfové míčky [34]

Společnost Hofmann GmbH. vytvořila síťovou strukturu v podobě temperační plochy (viz obr. 2.32) s cílem o zvýšení intenzity odvodu tepla konformní temperací. Tuto temperační plochu lze vytvořit již 2 mm od stěny dutiny formy [40]. Plocha umožňuje velkou průtočnou rychlost media, společně s vysokou teplotní stabilitou, neboť čím lépe je přizpůsobena temperační plocha obrysu výstřiku, tím lépe a především také rychleji, je umožněna jeho temperace. Temperační plochu je možné, podobně jako temperační kanály, rozdělit na jednotlivé temperační okruhy, čímž se docílí homogenního teplotního pole na celé ploše výstřiku. Na základě zkušeností firmy Hofmann GmbH. nedochází k znečištění či usazování nečistot v temperačních kanálech. Tomuto problému předcházejí čistící kanály (viz obr. 2.32), jenž zamezují i v zaoblených přechodech vzniku mrtvých zón,

které znečišťování a usazování nečistot vznikaly [40]. Toto čištění je umožněno i na samotném vstřikovacím stroji.



Obr. 2.32: Konformní systém v podobě temperační plochy [40]

Pro výrobu konformních temperačních ploch byla vyvinuta speciální nástrojová ocel CL50WS. Při její tvrdosti do 54HRC a vysoké tuhosti lze zpracovávat tuto ocel všemi běžnými technologiemi (frézováním, svařováním, broušením), včetně následného zušlechťování (plazmovou nitridací, povlakováním). Konstrukčním omezením temperační plochy je maximální rozměr 350 x 320 x 250 mm [40].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části diplomové práce je analýza konformního způsobu chlazení tvarových vložek vstřikovacích forem. Pro tyto účely bylo použito bezdotykového měření teplotních polí na povrchu výstřiku při výrobě (bezprostředně po jejich vyjmutí z tvarových dutin formy) termokamerou (ThermaCAM P65) a numerické simulace, která je provedena také za účelem hodnocení deformace výstřiků. Vzhledem ke skutečnosti, že fáze chlazení a tuhnutí výstřiků významným způsobem ovlivňuje jejich morfologii, je v experimentální části provedeno také hodnocení stupně krystalinity metodou diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC).

#### 3.1 Charakteristika nástroje a stroje

V experimentálním měření bylo provedeno porovnání vlivu konformní a konvenční temperance u výstřiků v podobě reklamního žetonu (do nákupních košíků) (viz obr. 3.1) na základě spolupráce s firmou A. Raymond Jablonec s. r. o., pro účely experimentálního měření bylo použito dvou polymerních materiálů: PP – Sabic PP 56M10 a PA – Zytel MT409AHS NC010 se 2% barviva.



Obr. 3.1: Vstřikovaný díl

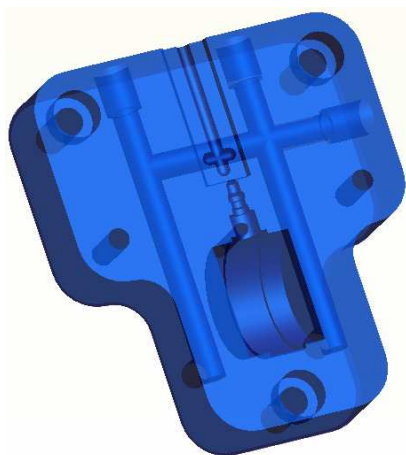
Výstřiky byly vyráběny ve dvoudeskové ocelové vstřikovací formě (s násobností 1+1+1) s třemi různými vložkami:

- Ocelovou vložkou vyrobenou z materiálu dle ČSN 19552 (DIN 1.2343) a opatřenou klasickými vrtanými temperačními kanály (viz obr. 3.2).
- Ocelovou vložkou s optimalizovanými temperačními kanály (viz obr. 3.3) vyrobenou laserovým slinováním - technologií DMLS (viz kap. 2.5.1) z materiálu MS1 – Martenzitická ocel (DIN 1.2709) včetně temperačních

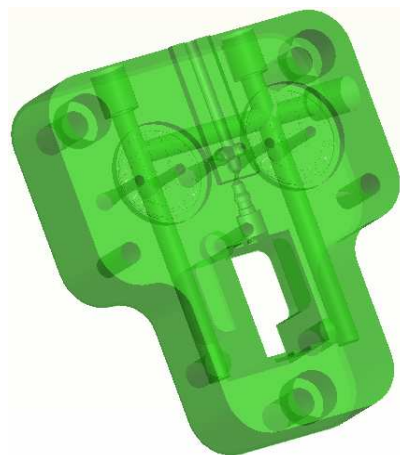


kanálů, které jsou totožné s temperační soustavou slinované bronzové vložky. V tomto případě probíhala výroba formy laserem s přidavkem 0,2-0,3 mm s dopracováním elektroerozí. Výsledný povrch slinované formy je téměř srovnatelný s povrchem klasické ocelové vložky.

- Bronzovou vložkou s optimalizovanými temperačními kanály (viz obr. 3.3) vyrobenou z materiálu Metal Direct 20. Výroba vložky s temperační soustavou probíhala technologií DMLS laserem na čisto a s následným přebroušením dělicí roviny. Avšak výsledný povrch byl výrazně hrubý, což se v určitých případech negativně projevilo při vstřikování, resp. při vyhazování výstřiků z formy. Při výrobě prvních výstřiků u této bronzové tvarové vložky prolínala voda do dělicí roviny (viz obr. 3.4), proto bylo potřeba utěsnit tvarovou vložku pryskyřicí.

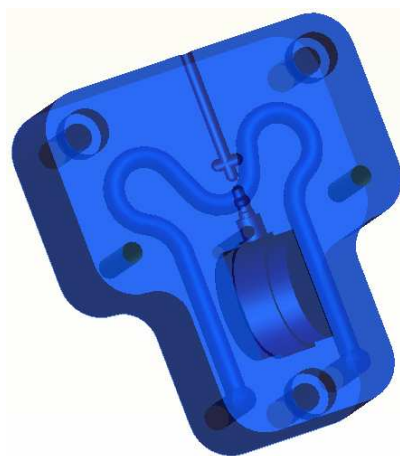


Průhled pevné vložky

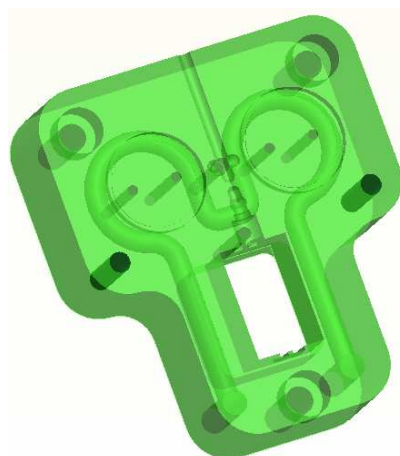


Průhled pohyblivou vložkou

Obr. 3.2: Ocelové vložky formy s vrtanými temperačními kanály

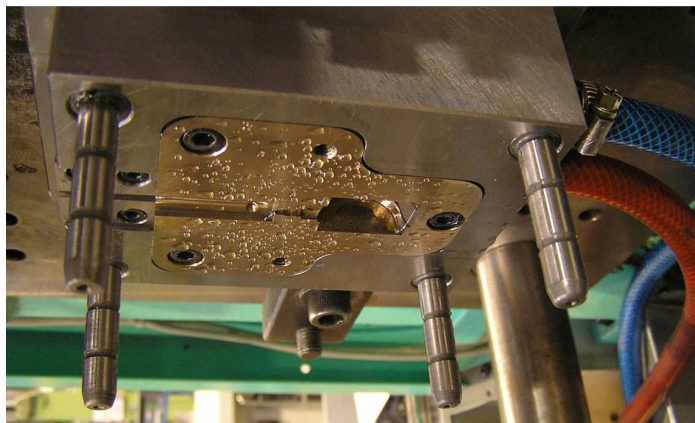


Průhled pevné vložky



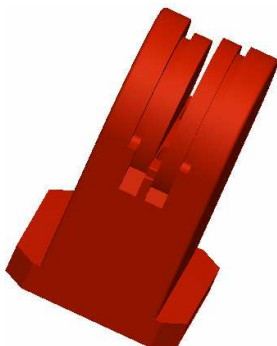
Průhled pohyblivou vložkou

Obr. 3.3: ocelová i bronzová vložka formy s konformní temperací



Obr. 3.4: Prolínání vody z temperačního systému do dělicí roviny u laserově slinované bronzové vložky formy

Vstřikovací forma se skládá mimo výše uvedených vložek i z vnitřní výsuvné vložky z materiálu ČSN 19552 (viz obr. 3.5), která formovala dutinu držáku žetonů (viz obr. 3.6) a byla určena k odzkoušení chování výsuvných dílů (pro oblast, která nesouvisí s řešeným tématem diplomové práce), přičemž byla u všech třech typů vložek totožná.



Obr. 3.5: Vnitřní výsuvná vložka



Obr. 3.6: Výsuvný díl

Vstřikovací forma, resp. tvarové vložky formy jsou opatřeny temperačním systémem pro cirkulující teplotnosné medium (vodu) uvnitř temperačních kanálů, který se skládá ze dvou samostatných okruhů pro tvárník i tvárnici. V případě laserově slinovaných vložek formy kopíruje temperační systém tvarové dutiny formy.

Vyhození výstřiků z tvarových vložek plněných tunelovým ústím vtoku zajišťovaly vyhazovače umístěné v čele dvou tvarových dutiny formy.

K výrově výstřiků byl použit šnekový hydraulický vstřikovací stroj Arburg Allrounder 270 S-350-150 (viz obr. 3.7) s uzavírací silou 350 kN, průměrem šneku 25 mm a teoretickým vstřikovaným objemem 54 cm<sup>3</sup>.



Obr. 3.7: Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 270 S-350-150 [41]

Výroba výstřiků na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 270 S-350-150 podléhala technologickým podmínkám uvedeným v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Technologické parametry vstřikování

Parametr	Materiál	
	Sabic PP 56M10	Zytel MT409AHS NC010
$T_{I,II,III}$ [°C]	225/220/220	290/290/280
$T_{tryska}$ [°C]	230	295
$T_{tm}$ [°C]	14	40
$p_{vstř}$ [MPa]	91,8	97,6
$p_d$ [MPa]	70,7	81,8
$v_{vstř}$ [cm/s]	180	130
$t_v$ [s]	0,8	0,74
$t_d$ [s]	4	4
$t_{ch}$ [s]	7	7/4
$t_c$ [s]	16,9	16,3/13,5

Během vstřikování byla pro oba typy polymerních materiálů shodná doba chlazení (viz tab. 3.1)  $t_{ch} = 7$  s (označení PP/7, PA/7). Jelikož je v experimentální části diplomové práce hodnocen vliv konformního způsobu temperace na chladnutí a tuhnutí výstřiku, byla provedena výroba dílů i při zkrácené době chlazení v případě materiálu PA Zytel MT409AHS NC010  $t_{ch} = 4$  s (označení PA/4). Avšak u výstřiků z bronzové laserově slinované tvarové vložky při zkrácené době chlazení docházelo k výše zmíněnému



negativnímu vlivu hrubého povrchu dělicí roviny formy (poškození výstřiků vyhazovači), což neumožnilo použít tyto výstřiky pro hodnocení vlivu konformního chlazení.

Před začátkem vstřikování byl PA vlivem výrazné navlhavosti sušen v sušičce Moretto při teplotě 80°C po dobu 4 hodin.

### 3.2 Charakteristika polymerních materiálů

➤ Polypropylen Sabic PP 56M10 je semikrystalický kopolymer s vysokou tuhostí a velmi výraznou rázovou odolností i při nízkých teplotách. Tento materiál má uplatnění především při výrobě komponentů v automobilovém průmyslu, ale též při výrobě nádob, přepravek, boxů, atd. Jeho užité vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Vybrané vlastnosti polypropylen Sabic PP 56M10 [42]

SABIC PP 56M10				
Fyzikální vlastnosti	Podmínky měření	Hodnota	Jednotky	Norma
Hustota		905	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
Objemový index toku taveniny	230°C/2.16kg	6,2	g/10 min	ISO 1133
Objemový index toku taveniny	230°C/5kg	27	g/10 min	ISO 1133
Modul pružnosti v tahu	23°C	1340	MPa	ISO 527-2
Modul pružnosti v ohybu	-	1550	MPa	ASTM D 790
Napětí na mezi kluzu v tahu	-	32	MPa	ISO 527-2
Napětí při přetržení v tahu	-	30	MPa	ISO 527
Vrubová houževnatost - Charpy	-20°C	3	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
Vrubová houževnatost - Charpy	0°C	5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
Vrubová houževnatost - Charpy	23°C	10	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
Vrubová houževnatost - Izod	-20°C	4	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/4A
Vrubová houževnatost - Izoda	0°C	5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/4A
Vrubová houževnatost Izoda	23°C	10	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/4A
Tvarová stálost za tepla Vicat	50°C/10N	147	°C	ISO 306/A
Tvarová stálost za tepla Vicat	50°C/50N	77	°C	ISO 306/B
Tvrdost Shore D	-	68	-	ISO 868
Teplota tání	-	140 -170	°C	-

- Polyamid Zytel MT409AHS NC010 je semikrystalický termoplastický materiál s dobrou odolností vůči chemikáliím, olejům a rázům. Používá se především v automobilovém průmyslu, elektronice či při výrobě sportovního vybavení. Jeho užité vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3: Vybrané vlastnosti polyamidu Zytel MT409AHS NC010 [43]

<b>ZYTEL MT409AHS NC010</b>				
Fyzikální vlastnosti	Podmínky měření	Hodnota	Jednotky	Norma
Hustota	23/50	1110	Kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
Nasákavost	23°C/24 hod	1,3	%	ISO 62
Modul pružnosti v tahu	-40°C	2620	MPa	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu	0°C	2470	MPa	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu	23°C	2500	MPa	ISO 527-2
Modul pružnosti v ohybu	23°C	2300	MPa	ASTM D 790
Napětí na mezi kluzu v tahu	-40°C	85	MPa	ISO 527-2
Napětí na mezi kluzu v tahu	23°C	62	MPa	ISO 527-2
Poměrné prodloužení při přetržení	-40°C	8,1	%	ISO 527-2
Poměrné prodloužení při přetržení	23°C	5,0	%	ISO 527-2
Vrubová houževnatost - Charpy	-40°C	13	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 170/1eA
Vrubová houževnatost - Charpy	23°C	21	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 170/1eA
Teplota sušení	-	80	°C	-
Doba sušení	-	2 – 4	h	-
Teplota tání	-	270-300	°C	-

### 3.3 Termovizní měření teplotních polí výstřiků

Pro záznam termovizního měření byla použita termokamera, která zachycuje a zobrazuje rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku [44]. Princip termokamery je nejbližší principu radiačního přenosu tepla, tedy tepelné energii tělesa [45]. Vyzařování tepelné energie z povrchu tělesa je charakterizováno Stephan-Boltzmannovým zákonem [45].

$$W = \delta \cdot \epsilon \cdot T \quad (3.1)$$

kde:

$W$  ... radiační tok jednotkou plochy [W/cm<sup>2</sup>]

$\delta$  ... Stephan-Boltzmannova konstanta [W/cm<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

$$\delta = 5,673 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{K}^4$$

$\varepsilon$  ... emisivita (jednota pro černé těleso) [-]

$T$  ... absolutní teplota tělesa [K]

Každé těleso v infračerveném spektru vyzařuje tepelné záření o různé vlnové délce a právě příslušná vlnová délka poté odpovídá dané teplotě. Termokamera je schopna toto tepelné záření zachytit a následně zaznamenat do termogramu (viz obr. 3.8), na kterém je přiřazena každé teplotě jiná barva. To umožňuje snadnou identifikaci rozložení teplotního pole [44].

### 3.3.1 Záznam teplotních polí termokamerou ThermaCAM P65

Před začátkem měření bylo nezbytné termokameru zaostřit a nastavit pro dané podmínky (emisivita termoplastu, apod.). Samotné měření teplotních polí na povrchu výstřiku bylo provedeno v závislosti na typu vložky formy, v níž byly výstřiky vyráběny. První ze tří variant byla ocelová vložka s klasicky obráběnými temperačními kanály, druhá a třetí varianta byla slinovaná vložka bronzová a ocelová. Při každém měření proběhlo v okamžiku po vystříknutí a vyjmutí výstřiků z formy pořízení záznamů termokamerou ThermaCAM P65 (viz obr. 3.8) od firmy Flir Systems a zapůjčenou firmou Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o.

Snímané digitální fotografické záznamy tepelné energie byly dále zpracovány pomocí uživatelského softwaru ThermaCAM QuickView 3.1 a vyhodnoceny v důsledku porovnání změn při různých materiálech formy či využití odlišného způsobu temperace. Celý postup je znázorněn na obr.3.8.



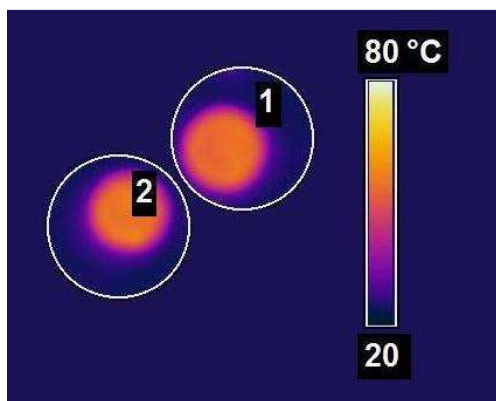
Obr. 3.8: Postup záznamu rozložení teplotního pole na výstřiku

### Technické údaje termokamery ThermoCAM P65 [46]:

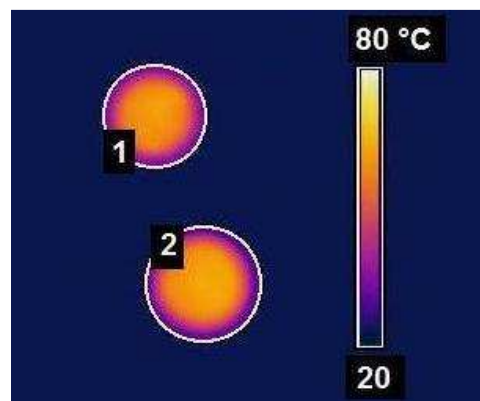
- teplotní rozsah měření: -40°C až 500°C
- teplotní citlivost: 0,08°C na 30°C při frekvenci obrazu 50/60 Hz
- přesnost  $\pm 2^\circ\text{C} - 2\%$
- zorné pole / min zobrazovací vzdálenost:  $24^\circ \times 18^\circ / 0,3 \text{ m}$
- emisivita: variabilní z 0,1 do 1,0, lze ji předdefinovat dle seznamu materiálů (pro polymerní materiály  $e = 0,8 - 0,95$ )
- prostorové rozlišení: 1,3 mrad
- spektrální rozsah: 7,5 až 13  $\mu\text{m}$
- permanentní provozní doba: 2 hodiny
- rozsah provozních teplot: -15°C až +50°C
- výstupní formát : AVI, JPEG

Vybrané záznamy získané termovizním měřením jsou seřazeny tak, aby je bylo možné vzájemně porovnávat (dle typu temperačního systému, materiálu vložky formy, materiálu polymeru nebo doby cyklu) na obr. 3.9 až obr. 3.16. Naměřené hodnoty maximálních teplot na povrchu výstřiků jsou uvedeny v tab. 3.4, včetně průměrných hodnot a jejich rozptylů.

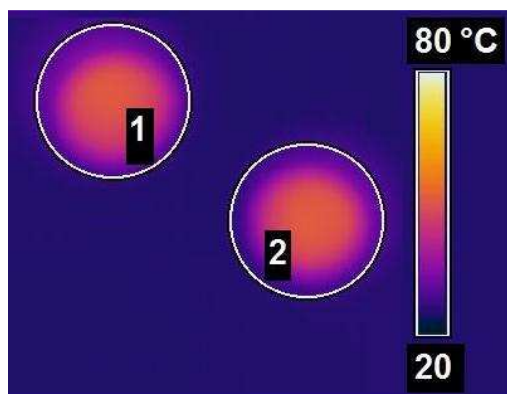
Termogramy materiálu Polypropylen Sabic PP 56M10, doba chlazení je 7s:



Obr. 3.9: Teplotní pole výstřiků PP, ocelová forma, konvenční chlazení,  $t_{\text{ch}}=7 \text{ s}$ .

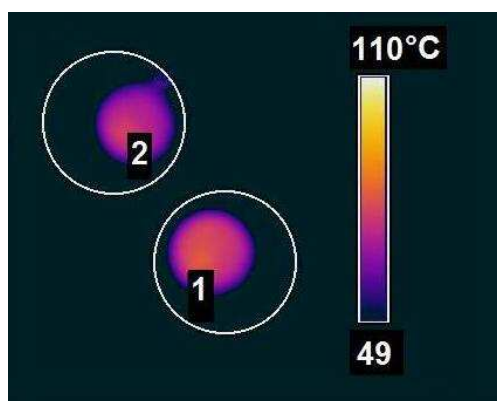


Obr. 3.10: Teplotní pole výstřiků PP, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{\text{ch}}=7 \text{ s}$ .

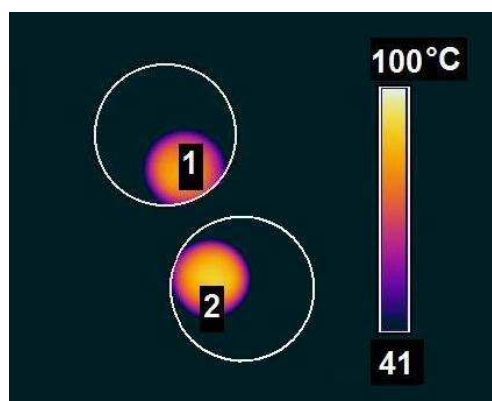


Obr. 3.11: Teplotní pole výstřiků PP,  
laserově slinovaná bronzová forma,  
konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

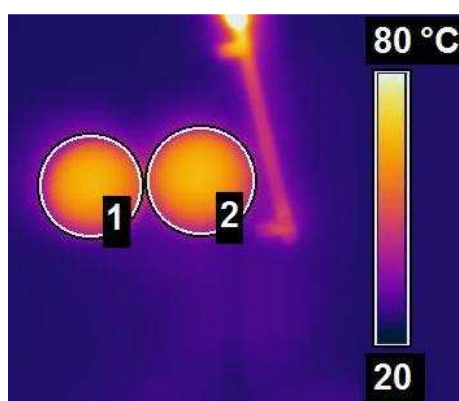
Termogramy materiálu Polyamid Zytel MT409AHS NC010, doba chlazení 7s:



Obr. 3.12: Teplotní pole výstřiků PA,  
ocelová forma, konvenční chlazení,  
 $t_{ch}=7$  s.

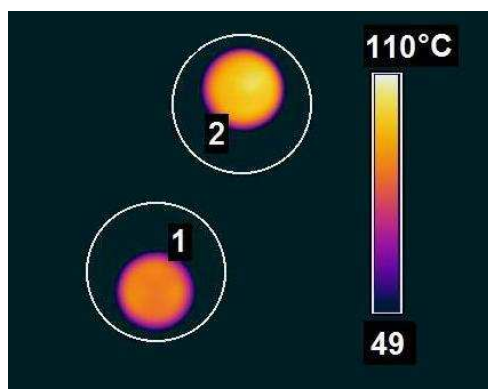


Obr. 3.13: Teplotní pole výstřiků PA,  
laserově slinovaná ocelová forma,  
konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

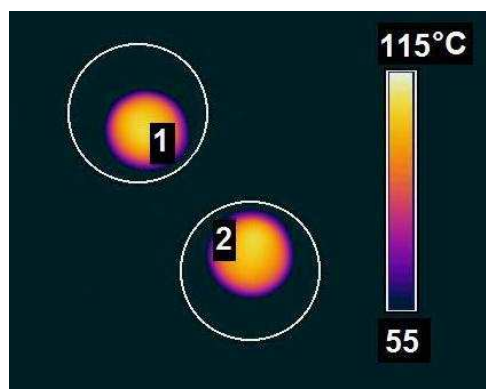


Obr. 3.14: Teplotní pole výstřiků PA,  
laserově slinovaná bronzová forma,  
konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

Termogramy materiálu Polyamid Zytel MT409AHS NC010, doba chlazení 4s:



Obr. 3.15: Teplotní pole výstřiků PA,  
ocelová forma, konvenční chlazení,  
 $t_{ch}=4$  s.



Obr. 3.16: Teplotní pole výstřiků PA,  
laserově slinovaná ocelová forma,  
konformní chlazení,  $t_{ch}=4$  s.

Tab. 3.4: Naměřené teploty dílů termokamerou

Materiál/doba chlazení [s]	Klasická ocel		Laserově slinovaná ocel		Laserově slinovaný bronz	
	Maximální naměřená teplota [°C]					
	díl č.1	díl č.2	díl č.1	díl č.2	díl č.1	díl č.2
PP/7	60,4	58,4	61,9	62,8	54,5	54,9
	61,2	63,4	65,7	66,7	54,4	51,7
	60,0	63,9	60,9	64,8	53,1	72,2
	59,4	59,8	64,8	65,8	51,4	51
Průměrná teplota [°C]	60,3	61,4	63,3	65,0	53,4	57,5
	±0,8	±2,7	±2,3	±1,7	±1,4	±9,9
PA/7	78,4	77,6	87,2	90,1	68,7	70,1
	77,5	76,8	88,7	91,2	70,2	68,3
	77,8	80,2	86,0	90,3	68,0	68,4
	78,9	83,5	86,3	87,1	67,4	67,7
Průměrná teplota [°C]	78,2	79,5	87,1	89,7	68,6	68,6
	±0,6	±3,0	±1,2	±1,8	±1,2	±1,0
PA/4	91,7	98,8	108,0	108,0	-	-
	93,3	102,0	107,0	107,0	-	-
	91,1	105,0	111,0	107,0	-	-
	92,5	99,3	111,0	105,0	-	-
Průměrná teplota [°C]	92,2	101,3	109,3	106,8	-	-
	±1,0	±2,9	±2,1	±1,3		

### 3.4 Měření stupně krystalinity metodou DSC

Metoda DSC patří mezi metody termické analýzy. Tyto metody popisují změny fyzikálně-chemických vlastností měřeného vzorku při ohřevu a jeho ochlazování. U termických metod je primární zjišťovanou veličinou změna entalpie, s jejíž změnou může dojít i ke změně hmotnosti sledovaného vzorku [47]. Hodnocením entalpie tání lze hodnotit případnou změnu stupně krystalinity, neboť platí, že se vzorek s vyšší entalpií tání krystalitů vyznačuje vyšší hodnotou stupně krystalinity [47]. U metody DSC je měřenou veličinou tepelná energie, která je potřebná ke kompenzaci rozdílu teplot mezi vzorkem a referenční látkou v závislosti na čase či teplotě. Na základě zaznamenávání potřebného tepelného příkonu k udržení tohoto nulového tepelného rozdílu vzniká DSC křivka (termogram).

#### 3.4.1 Výroba zkušebního vzorku

Vzorky použité pro analýzu metodou DSC byly získány z vystříknutých dílů uvedených v kap. 3.1. Každý typ výstřiku (v závislosti na druhu materiálu, způsobu temperace a materiálu formy) byl v polovině přestřižen a z této plochy, tak aby byly zajištěny stejné podmínky odběru vzorků (s ohledem na strukturu dílu), byly následně pomocí přístroje Mikrotom Leica RM 2265 (viz obr. 3.17) vytvořeny velmi tenké řezy (s tloušťkou cca 10  $\mu\text{m}$ ). Na vahách Technipronot (viz obr.3.18) byly naváženy mikrořezy z jednoho výstřiku s hmotností přibližně 10 mg a poté vloženy do hliníkové kapsle o průměru 5 mm (viz obr. 3.19).



Obr. 3.17: Mikrotom Leica RM 2265



Obr. 3.18: Váhy Technipronot



Hliníková kapsle se na ručním lisu (viz obr. 3.20) vzduchotěsně uzavřela. Hmotnosti jednotlivých vzorků umístěných v hliníkových kapslích jsou uvedeny v tab. 3.5. Jelikož rozdílná hmotnost vzorků ovlivňuje nepříznivě výsledky měření, bylo důležité používat srovnatelné hmotnosti vzorků.



Obr. 3.19: Hliníkové kapsle [48]



Obr. 3.20: Zalisování vzorku na ručním lisu [48]

Tab. 3.5: Hmotnosti vzorků pro analýzu DSC

Materiál vzorku / doba chlazení	Typ formy		
	Klasická ocelová	Ocelová slinovaná	Bronzová slinovaná
	Hmotnost vzorků [mg]		
PP/7	9,8	9,9	9,9
PA/7	9,6	9,8	9,8
PA/4	9,7	-	-

### 3.4.2 Hodnocení stupně krystalinity

Před začátkem měření byl spuštěn program PE Pyris series, který po nastavení patřičných údajů vyhodnotil entalpii tání daných vzorků a nabídl grafický záznam tohoto vyhodnocení. Mezi potřebné údaje k nastavení patřila hmotnost vzorku, výdrž na počáteční teplotě (2min), počáteční teplota ohřevu (20°C), konečná teplota ohřevu (PP - 200°C, PA - 280°C), rychlost ohřevu (10°C/min), konečná teplota ochlazení (20°C) a rychlost ochlazování (10°C/min), aj. Na začátku měření se vložily vzorky v hliníkových kapslích do první měřící cely na přístroji DSC 6 od firmy Perkin Elmer (viz obr. 3.21).

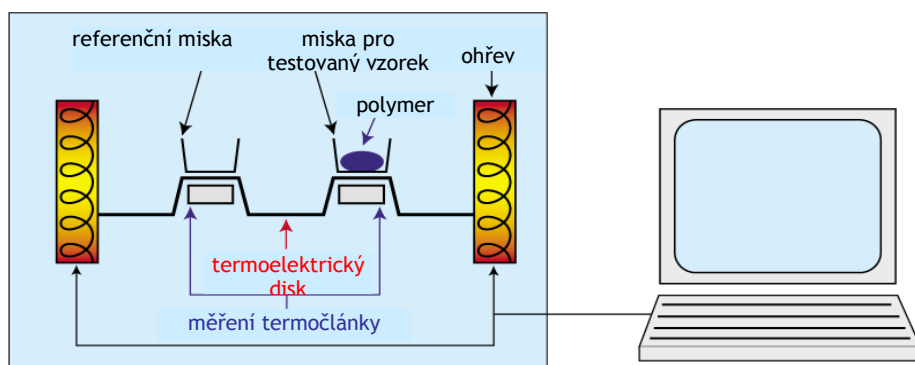


V druhé cele byl umístěn referenční vzorek (prázdná hliníková kapsle). Obě tyto cely jsou od okolní atmosféry tepelně izolovány pláštěm, což umožňuje ohřev uvnitř cel za konstantního tlaku.



Obr. 3.21: Přístroj DSC 6 Perkin Elmer

Po následném uzavření přístroje DSC 6 se nastavila na chladícím agregátu Minichiller CC inertní plynová atmosféra termoregulačním ventilem. Chladícím médiem byl zvolen dusík, jelikož zabraňuje podléhání vzorků oxidativní degradaci a také odvádí plynné produkty vznikající při zahřívání. Po uzavření přístroje a nastavení atmosféry se měřený i referenční vzorek v celách (viz obr. 3.22) začal ohřívat navzájem nezávislými topnými zdroji tepla, z čehož software postupně vyhodnocoval hodnoty, resp. entalpii tání pro dané vzorky v podobě DSC křivek (termogramů).



Obr. 3.22: Měření DSC analýzy [49]

Pro vyhodnocení termogramů bylo nutné určit plochu, která je úměrná teplotě tání, aby mohla být stanovena entalpie tání  $\Delta H_m$  [J/g], případně plochu úměrnou teplotě krystalizace pro stanovení entalpie krystalizace  $\Delta H_c$  [J/g]. Ke stanovení těchto ploch slouží inflexní body značící počátek a konec záznamu tání na křivkách termogramů a spojnice mezi nimi. Ze vztahu (3.2)

je poté možné, při znalosti teoretické entalpie tání plně krystalického polymeru  $\Delta H_m^*$  [J/g] a entalpie tání vzorku  $\Delta H_m$  [J/g], stanovit stupeň krystalinity neboli podíl krystalů  $X_{cm}$  [%] (čím vyšší je entalpie tání vzorku, tím vyšší bude stupeň krystalinity vzorku).

$$X_{cm} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^*} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.2)$$

kde:

$X_{cm}$  ... stupeň krystalinity [%]

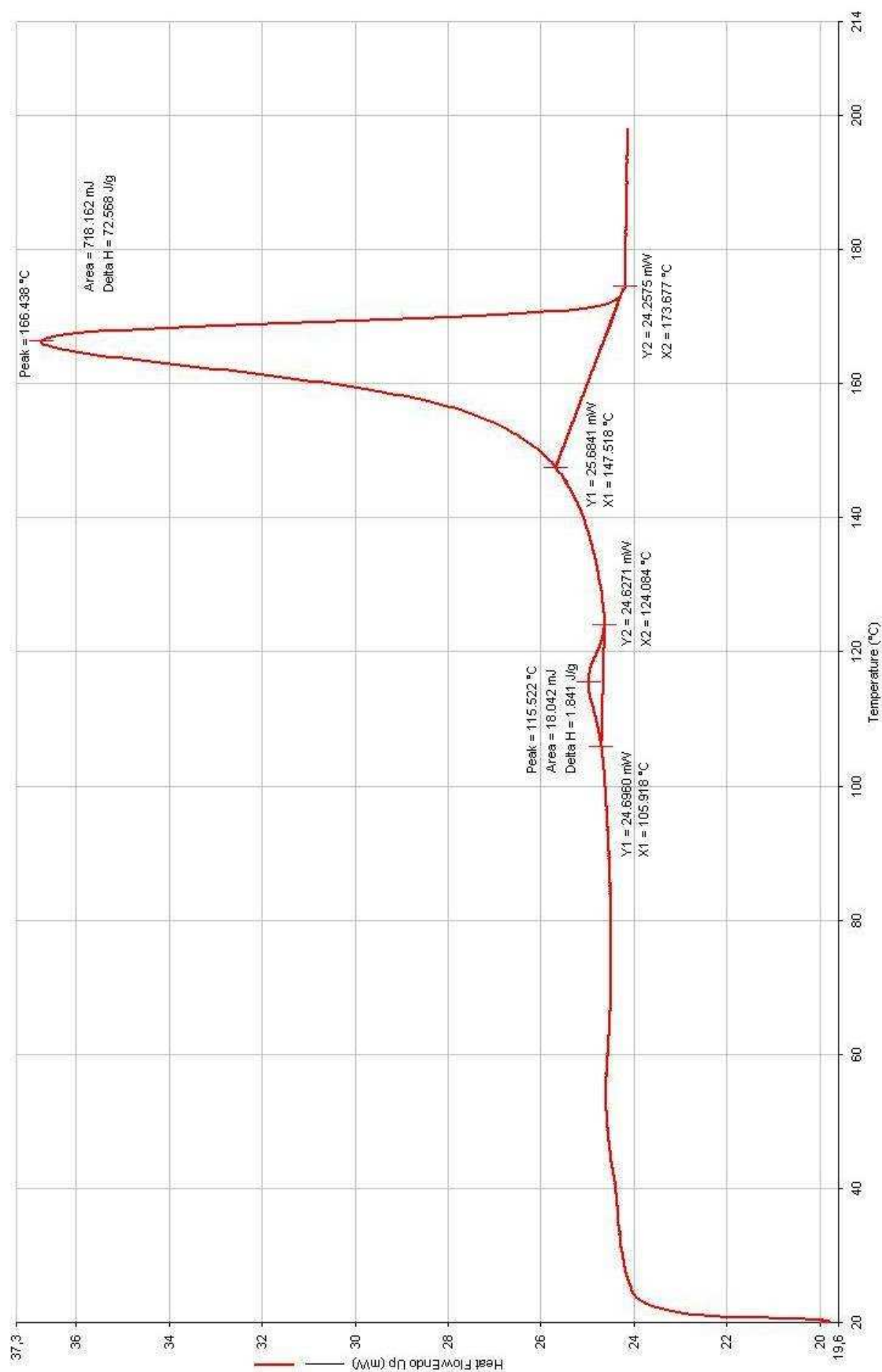
$\Delta H_m$  ... entalpie tání měřeného vzorku [J/g]

$\Delta H_m^*$  ... teoretická entalpie tání plně krystalického polymeru [J/g]

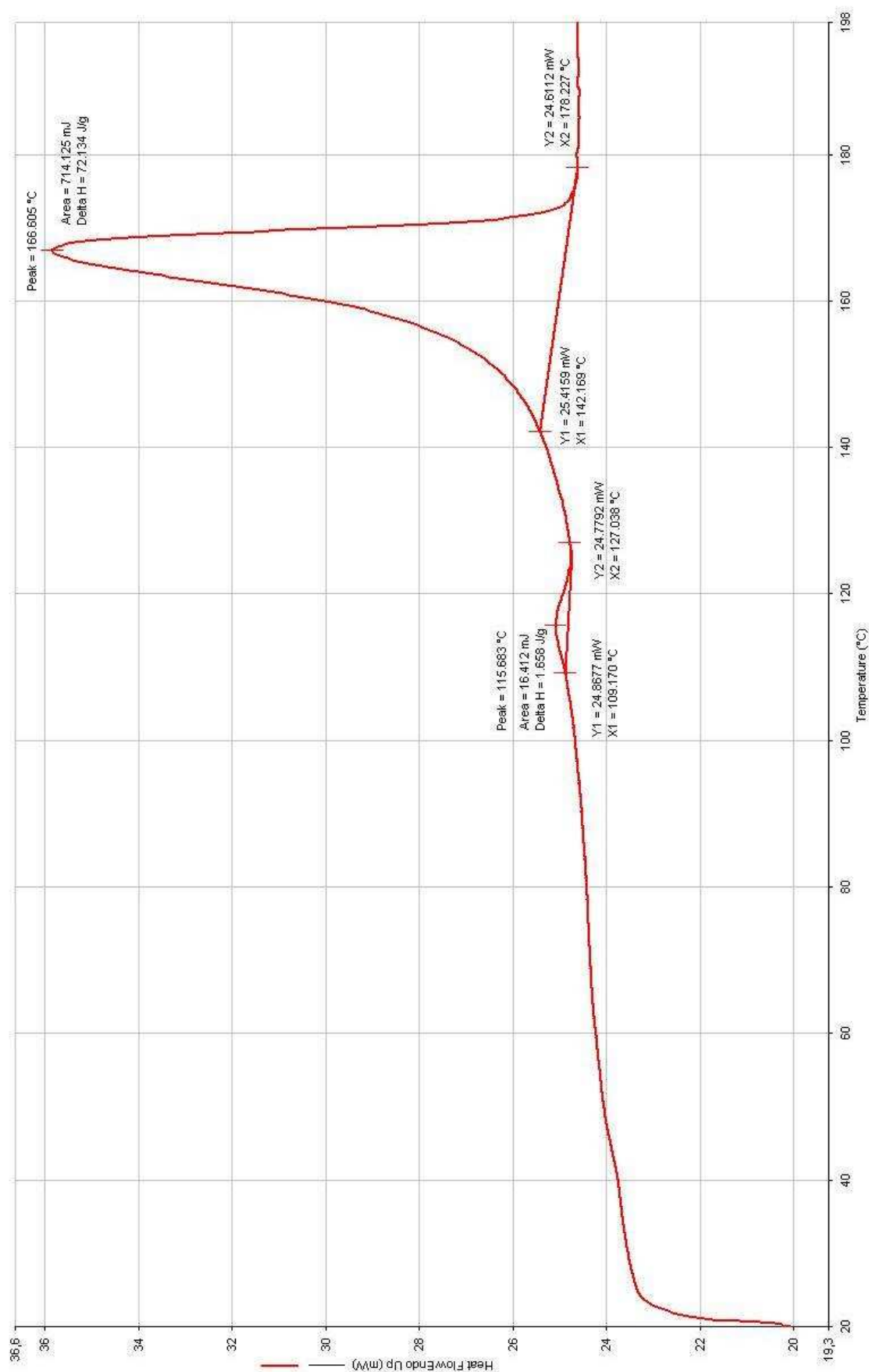
Přímo z termogramu lze stanovit teplotu tání  $T_m$  [°C] nebo teplotu krystalizace  $T_c$  [°C] (u amorfních termoplastů je možné stanovit i teplotu zesklennění  $T_g$  [°C]). Zaznamenané termogramy pro vybrané naměřené vzorky jsou uvedeny na obr. 3.23 až obr. 3.30 a jejich průměrné hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.6.

Tab. 3.6: Průměrné hodnoty entalpie tání

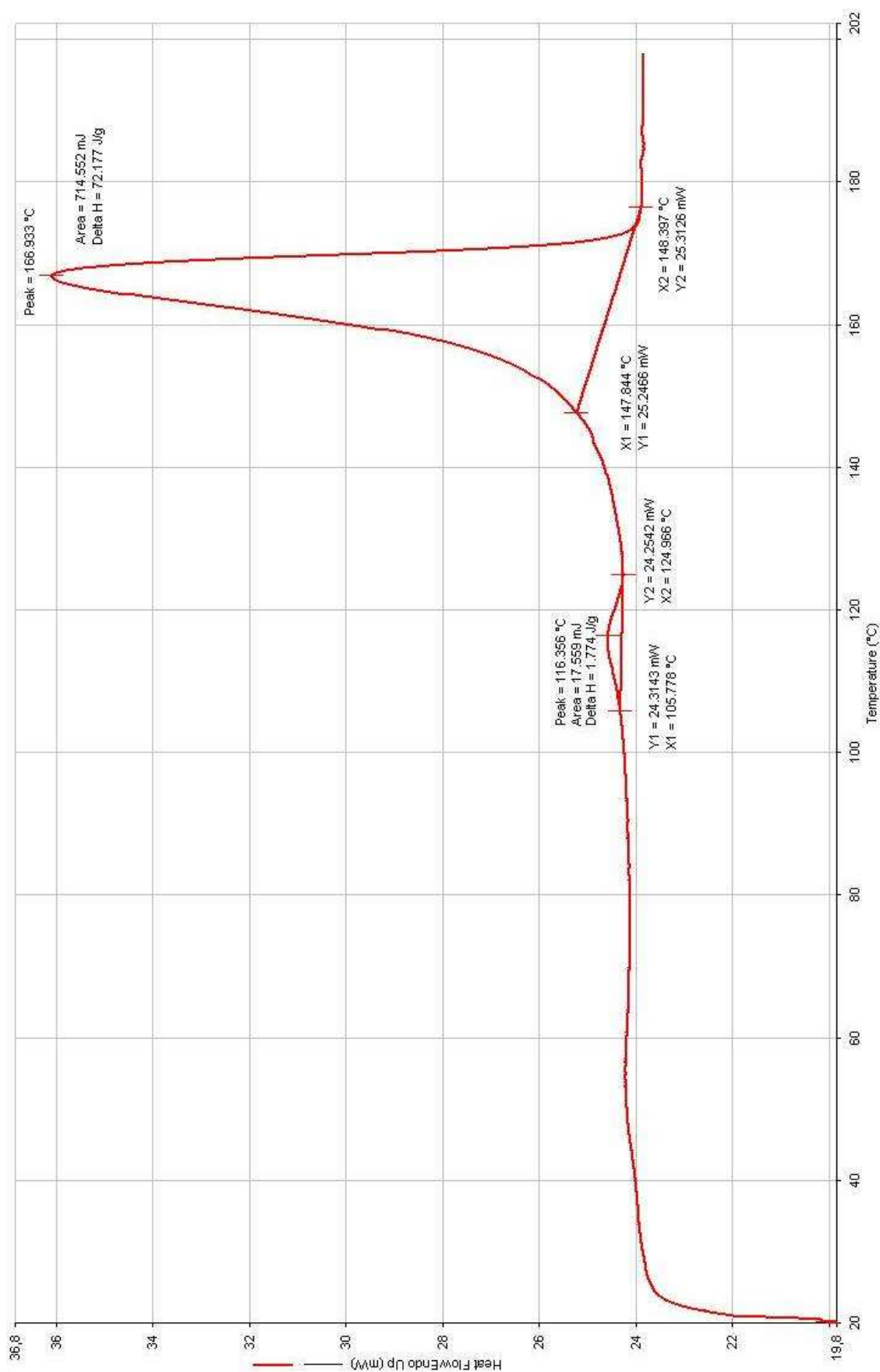
Materiál / doba chlazení [s]	Materiál formy	Entalpie tání $\Delta H_m$ [J/g]
<b>PP/7</b>	Klasická ocel	$72,9 \pm 0,6$
	Laserově slinovaná ocel	$72,2 \pm 0,8$
	Laserově slinovaný bronz	$72,7 \pm 0,6$
<b>PA/7</b>	Klasická ocel	$32,4 \pm 0,6$
	Laserově slinovaná ocel	$32,8 \pm 0,5$
	Laserově slinovaný bronz	$32,8 \pm 0,7$
<b>PA/4</b>	Klasická ocel	$33,1 \pm 0,2$
	Laserově slinovaná ocel	$33,8 \pm 0,4$



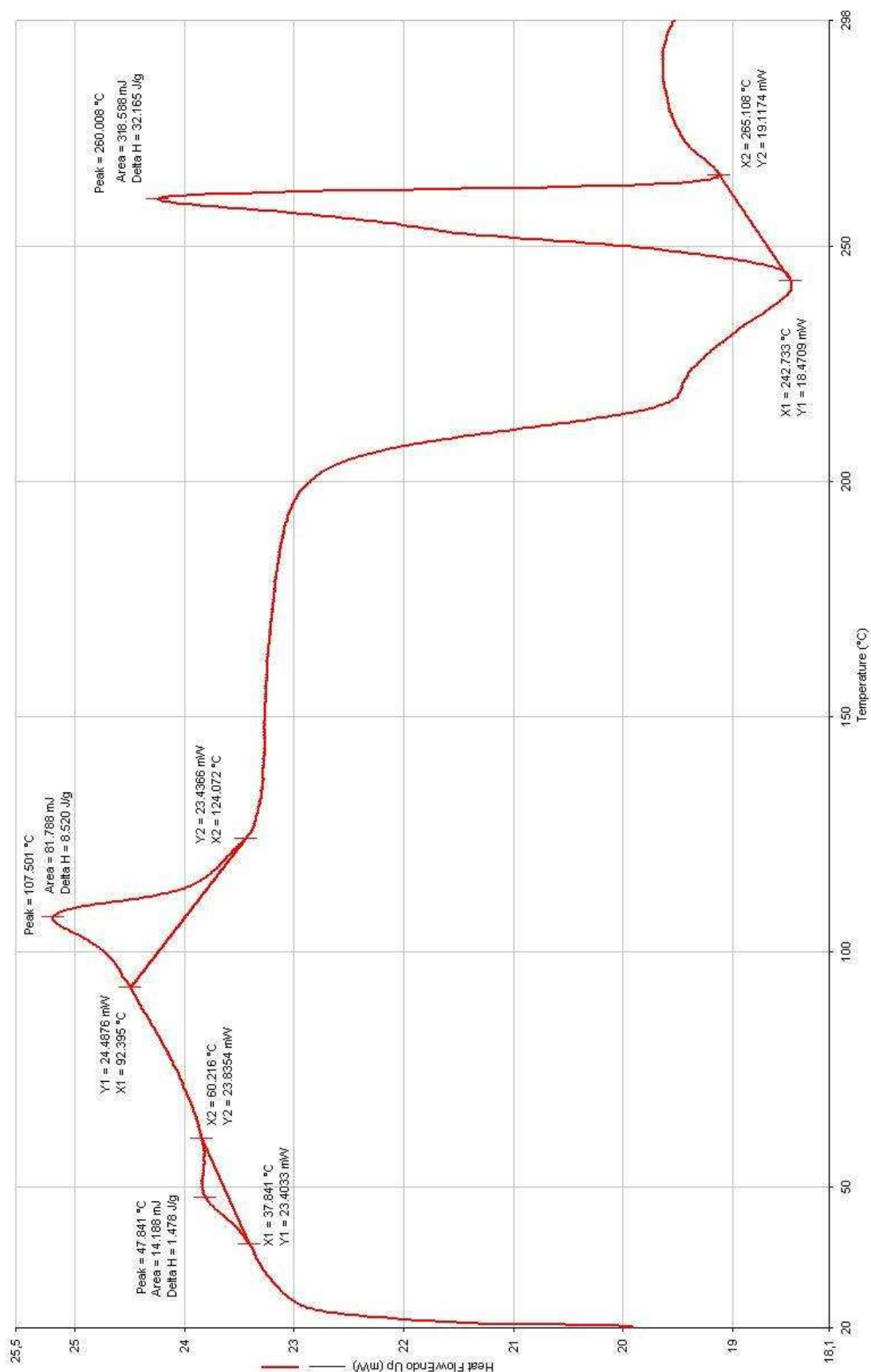
Obr. 3.23: Vyhodnocení termogramu vzorku PP z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při době chlazení  $t_{ch}=7s$ .



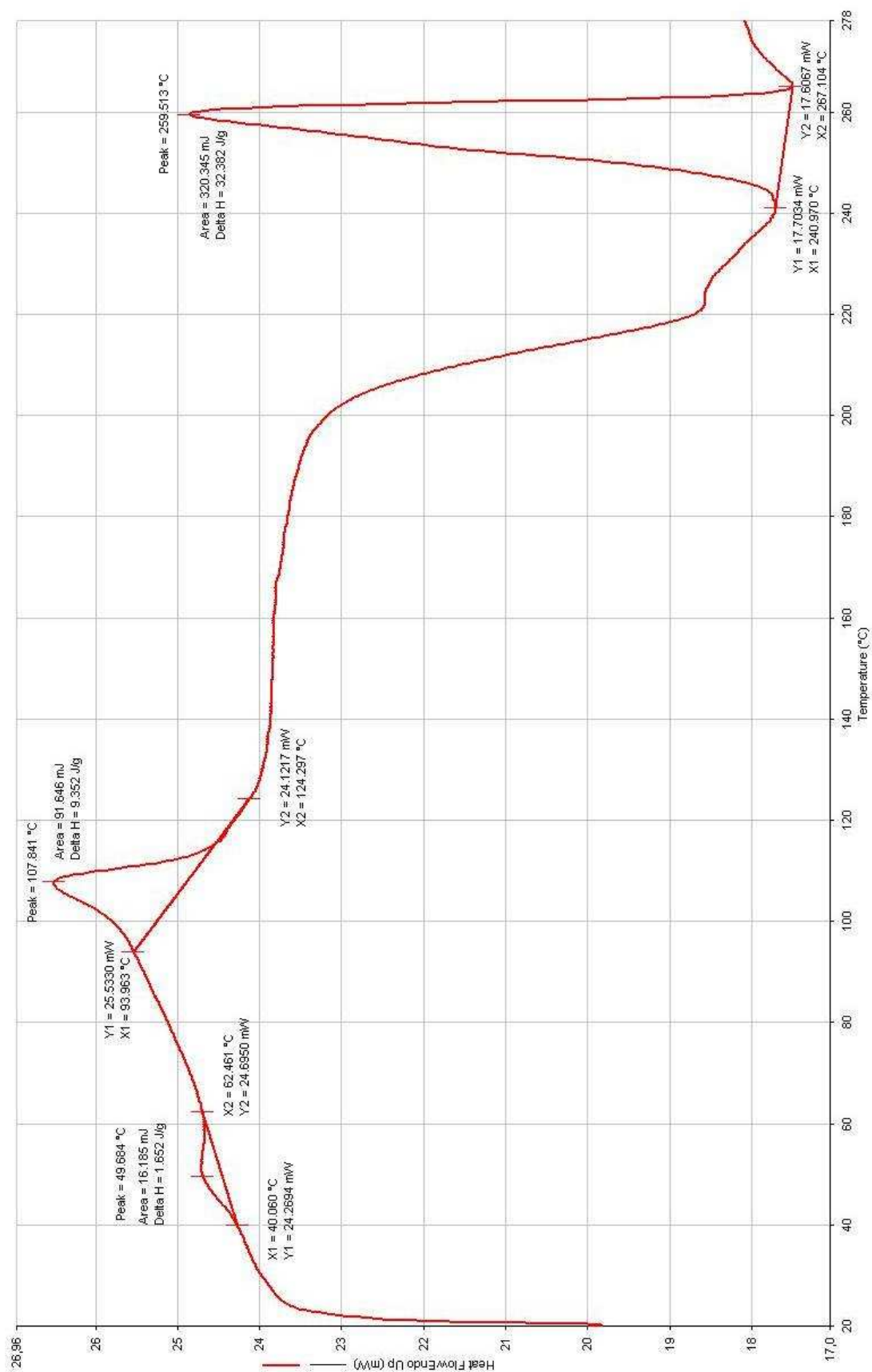
Obr. 3.24: Vyhodnocení termogramu vzorku PP z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7s$ .



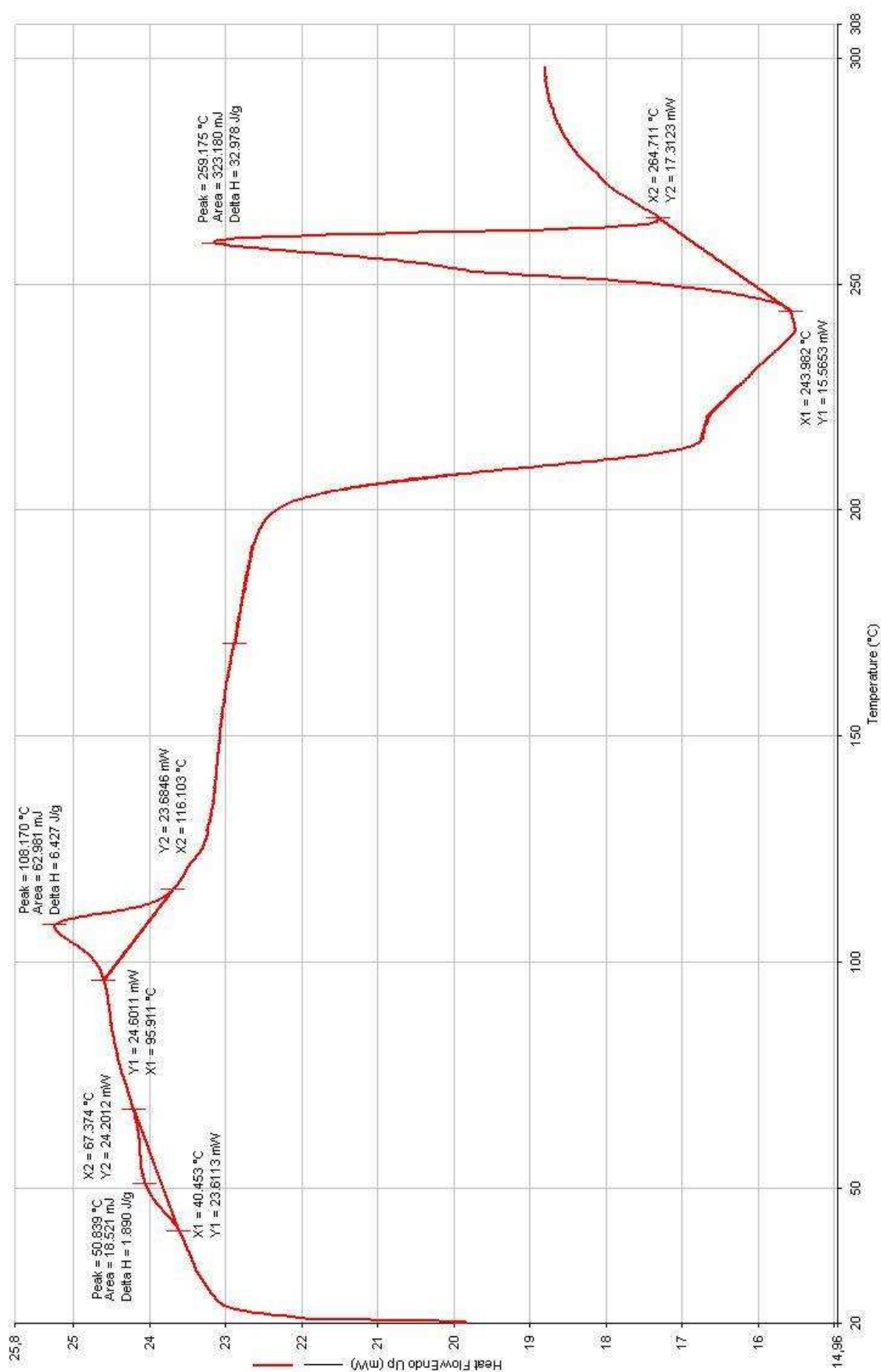
Obr. 3.25: Vyhodnocení termogramu vzorku PP z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7s$ .



Obr. 3.26: Vyhodnocení termogramu vzorku PA z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při době chlazení  $t_{ch}=7s$ .

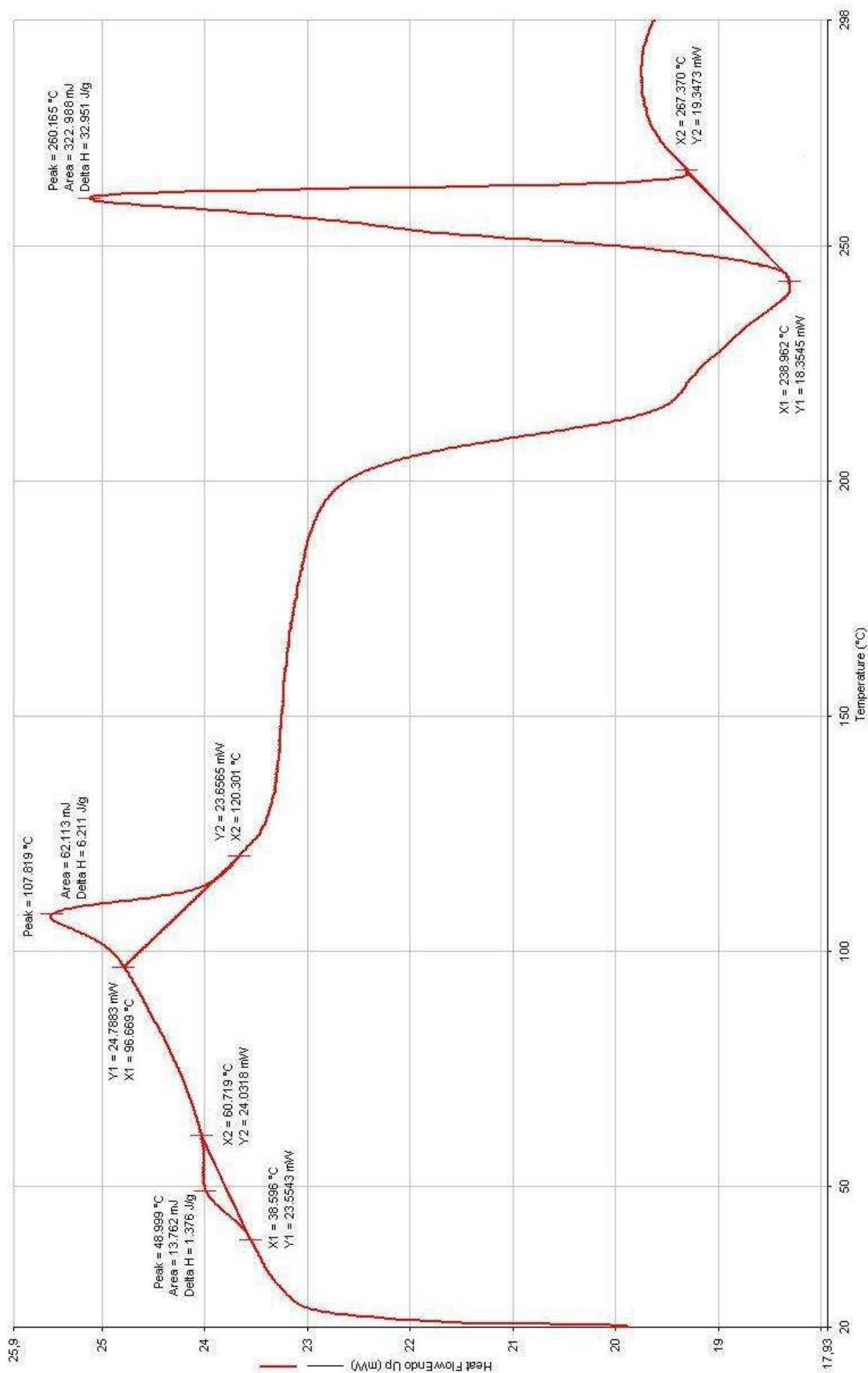


Obr. 3.27: Vyhodnocení termogramu vzorku PA z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7s$ .

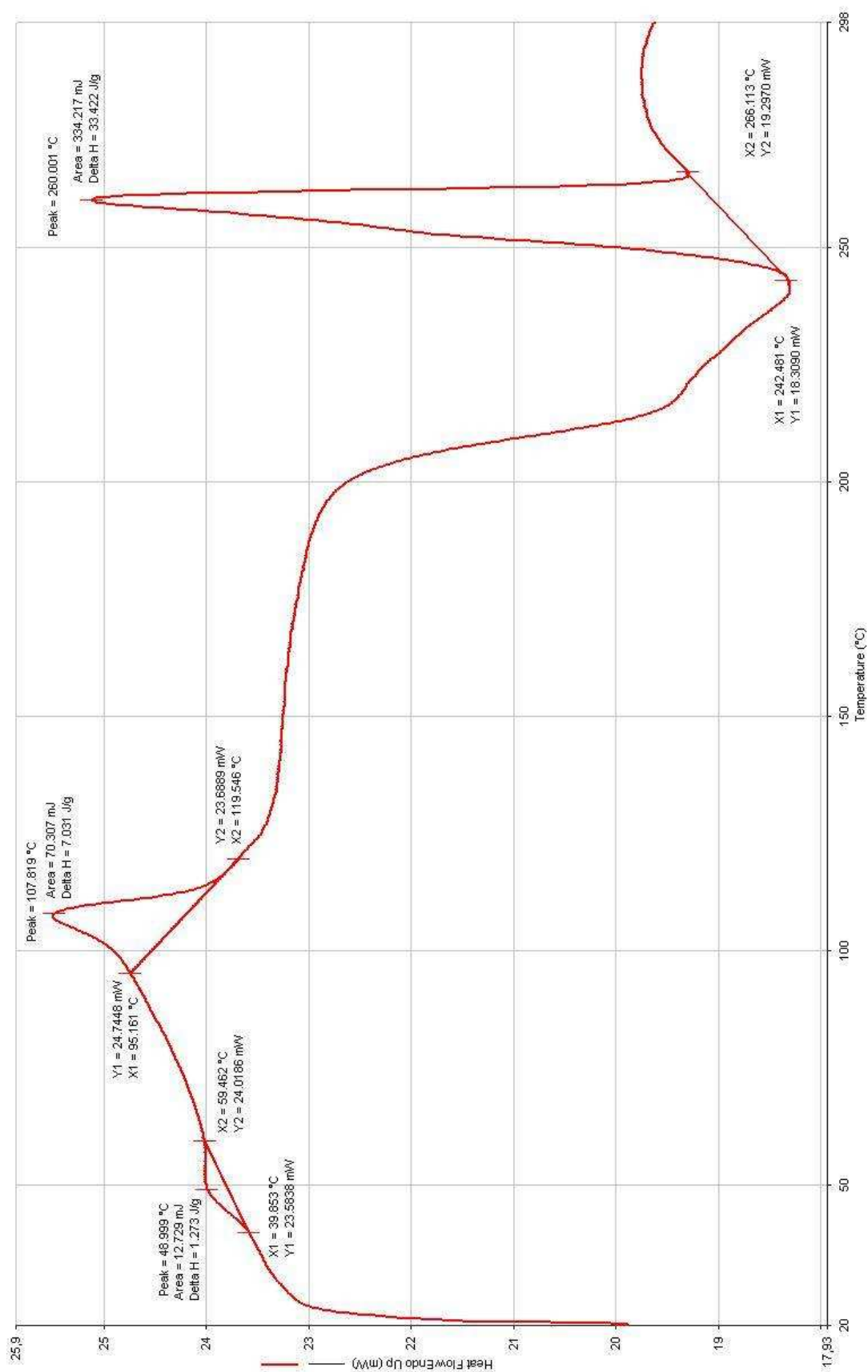


Obr. 3.28: Vyhodnocení termogramu vzorku PA z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7s$ .





Obr. 3.29: Vyhodnocení termogramu vzorku PA z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při zkrácené době chlazení  $t_{ch}=4s$ .



Obr. 3.30: Vyhodnocení termogramu vzorku PA z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při zkrácené době chlazení  $t_{ch}=4s$ .

### 3.5 Simulační analýza softwarem Cadmould 3D-F

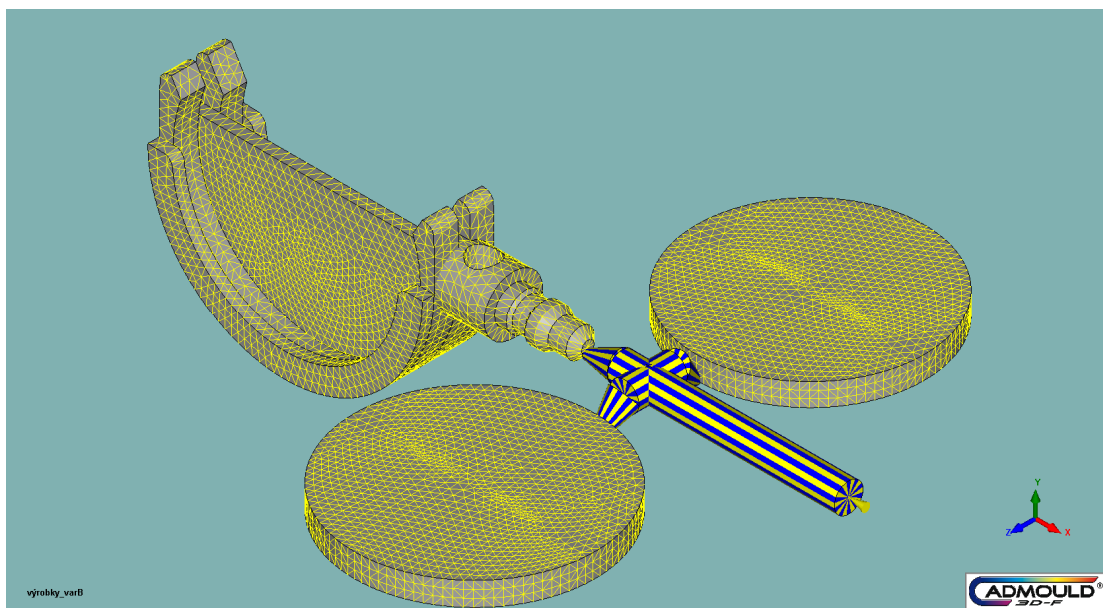
Pro zvýšení efektivity výroby se stále častěji využívají simulační programy založené na 3D technologii. Umožňují na vytvořeném modelu sledovat celkové chování vstřikovacího procesu včetně výsledných vlivů na výrobek, čímž se lze vyhnout chybám technologie výroby, způsobené např. špatnou konstrukcí formy či nevhodným tvarem výrobku, apod. [2]. Je však velmi důležité provést simulační proces v rané fázi vývoje výrobku, aby tak byla zajištěna požadovaná kvalita, rozměrová přesnost a funkčnost výrobku se současným snížením nákladů na výrobu formy i samotný výrobní proces ještě před jeho začátkem.

Software CADMOULD 3D-F analyzuje vstřikovací proces polymerních materiálů, kde je potřebný model ve formátu \*.stl. [50]. Simulační program následně provede výpočty založené na metodě MKP (Metoda konečných prvků), které jsou teplotně závislé, zohledňují strukturně - viskózní chování taveniny a respektují její stlačitelnost [50]. Analyzuje vstřikovací proces z hlediska plnění, dotlaku, chlazení, smrštění, deformace a zvyšuje tak kvalitu budoucích výrobků, pro účely experimentálního měření je použita analýza z hlediska deformace a rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku.

#### 3.5.1 Postup simulace Cadmould 3D-F

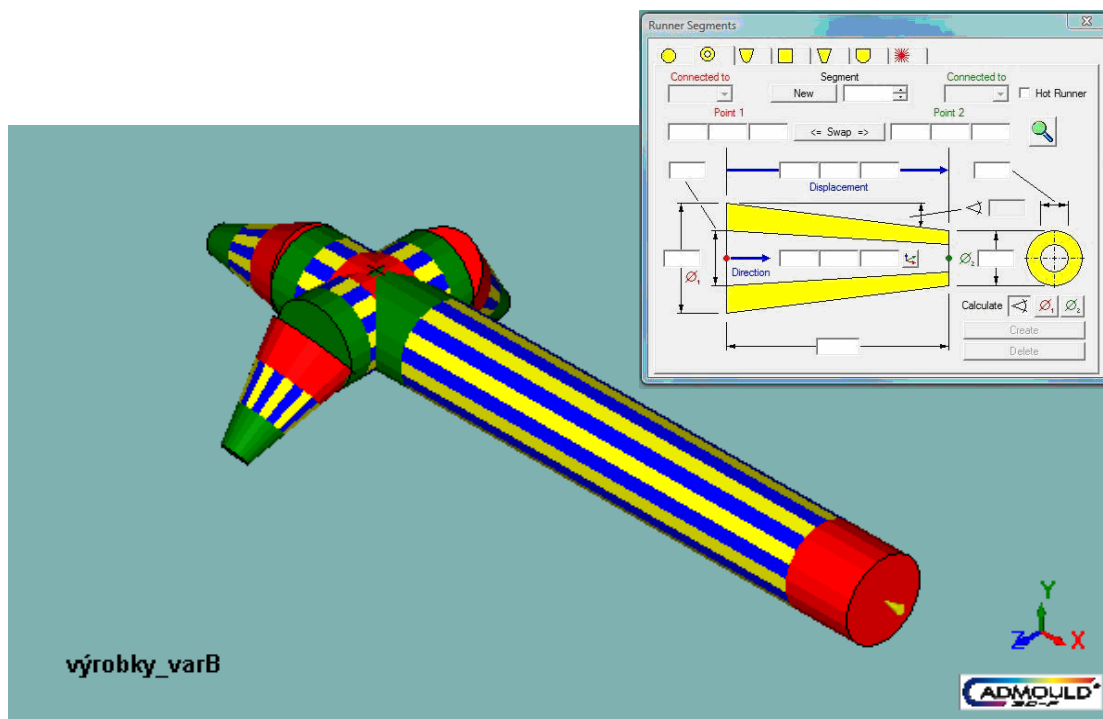
Simulační analýza proběhla na základě skutečných vstřikovacích parametrů (viz tab. 3.1), polymerních materiálů (viz kap. 3.2) a modelů forem (viz kap. 3.1), v nichž byl konečný díl (viz obr. 3.1) vstřikováním vyroben. Dodaný model byl s patřičným rozlišením překonvertován do formátu \*.stl. Postup přípravy simulační analýzy po načtení tohoto modelu do programu je uveden v následujících bodech.

- Po načtení modelu formy (tvarové dutiny) v patřičném formátu se zadala do programu Cadmould relativní velikost elementu a vytvořila se tak síť na modelu výstřiku (viz obr. 3.31).



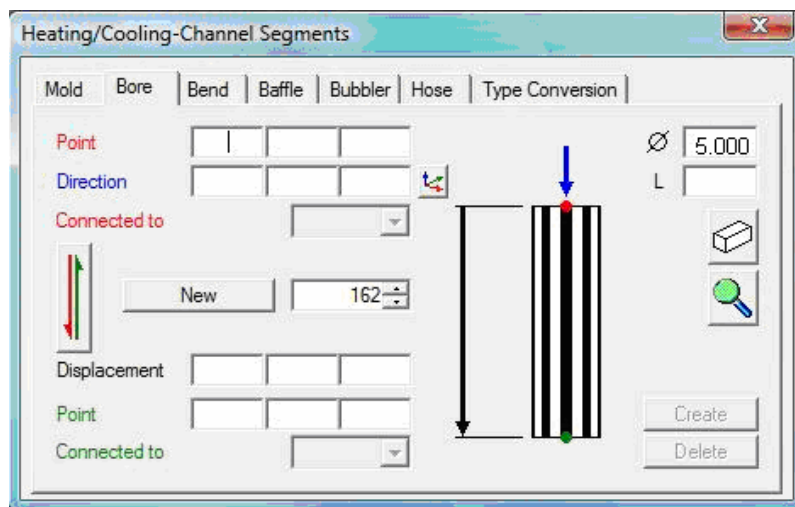
Obr. 3.31: Konečná síť na výstřiku

- Postupným vkládáním segmentů se navrhl vtokový systém (dle skutečnosti). Pomocí panelu nástrojů se zvolil průřez vtokového systému a jeho rozměry, které se týkají vytvářené části vtokového kanálu (viz obr. 3.32). V případě změny zadaných parametrů vtoku je lze snadno v panelu upravit.

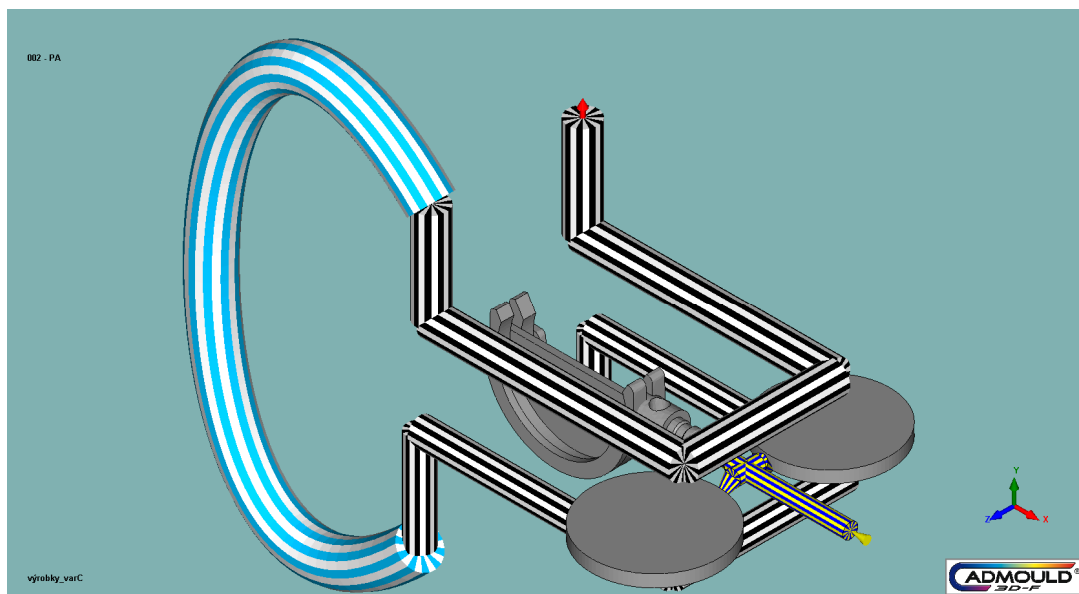


Obr. 3.32: Návrh vtokové soustavy

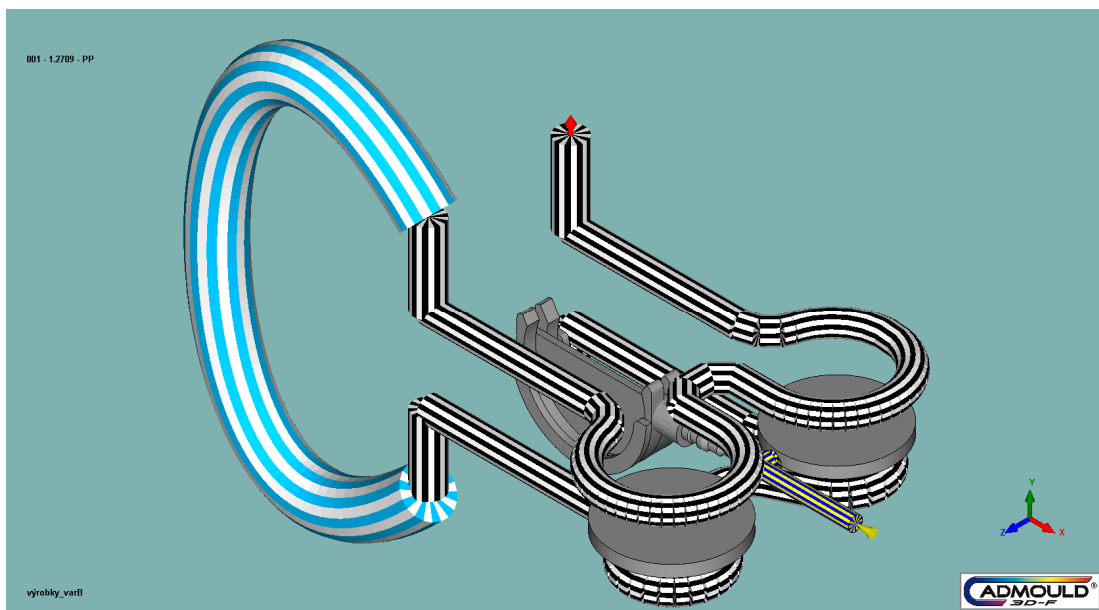
- Temperační soustava byla získána k dílu z modelu skutečné formy. Pomocí panelu nástrojů pro tvorbu a úpravu temperačních kanálů je tak upravena jejich poloha a současně nastaven průměr kanálů (5 mm) (viz obr. 3.33), případně lze v panelu nástrojů dodatečně upravit např. délku kanálu. Po zadání parametrů byly kanály propojeny hadicí do okruhu a určila se teplota a místo vstupu temperačního media. Na obr. 3.34 je znázorněna temperační soustava klasické ocelové vložky a na obr. 3.35 temperační soustava slinovaných vložek formy (obě mají totožnou temperační soustavu, tj. bronzová i ocelová slinovaná vložka).



Obr. 3.33: Panel nástrojů pro tvorbu a úpravu temperačních kanálů

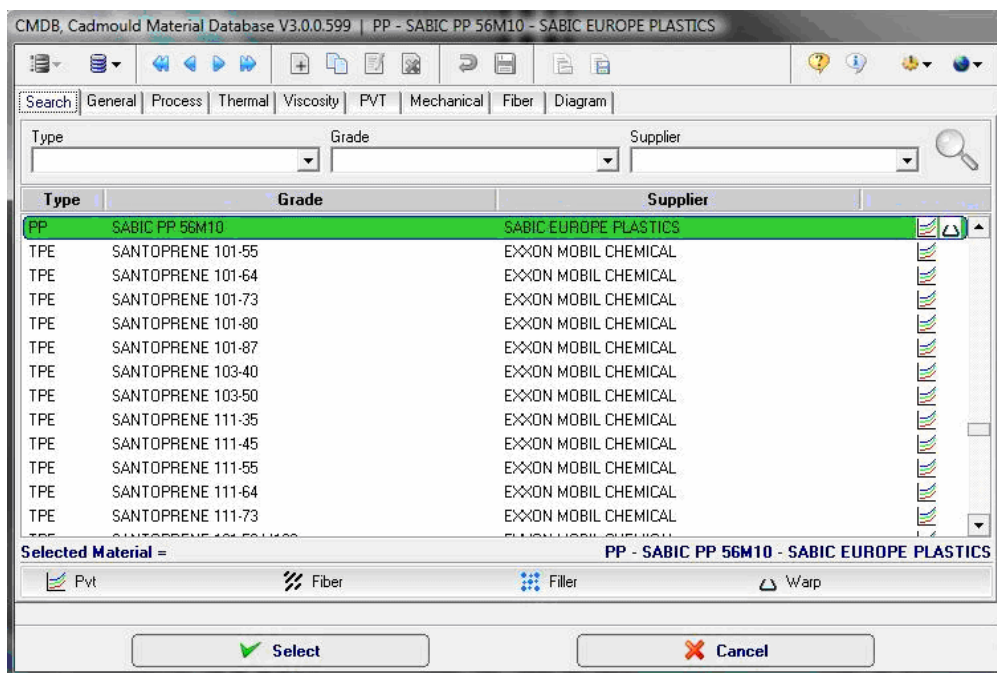


Obr. 3.34: Temperační soustava u klasické ocelové vložky formy



Obr. 3.35: Temperační soustava u slinované ocelové i bronzové vložky formy

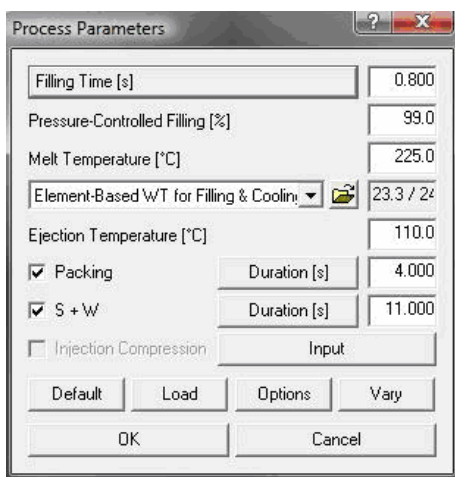
- Z programové knihovny (viz obr. 3.36) byl následně vybrán požadovaný materiál. Avšak i přes širokou řadu materiálů nebyl PA Zytel MT409AHS NC010 v databázi knihovny nalezen, proto došlo k jeho nahrazení materiálem s co nejbližšími vlastnostmi. Taktéž při volbě materiálu formy Direct Metal 20, musel být vybrán jiný materiál se shodným součinitelem tepelné vodivosti (30 W/mK).



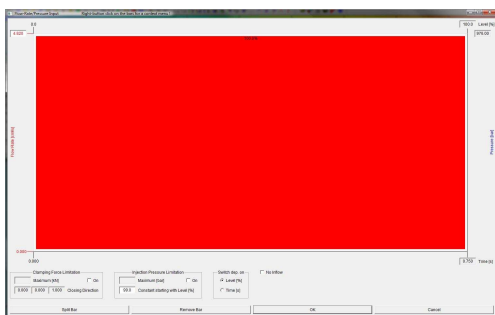
Obr. 3.36: Volba materiálu



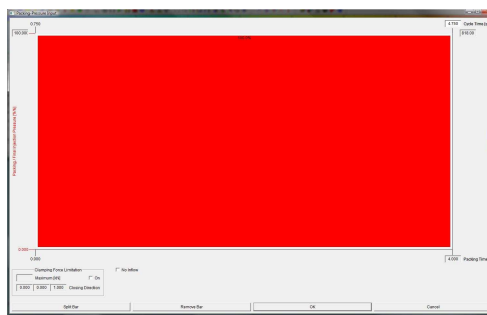
- Po zadání materiálů se v simulačním programu nastavily procesní (vstřikovací) parametry (např. doba chlazení, doba cyklu, teplota taveniny, apod.) v názorné tabulce (viz obr. 3.37). Vstřikovací tlak a dotlak s konstantní hodnotou byl určen pomocí grafu, kdy se požadovaný průběh nastavil pouze pomocí myši počítače (viz obr. 3.38 a obr. 3.39). Všechny procesní parametry odpovídali skutečným vstřikovacím parametrům z tab. 3.1.



Obr. 3.37: Nastavení procesních parametrů



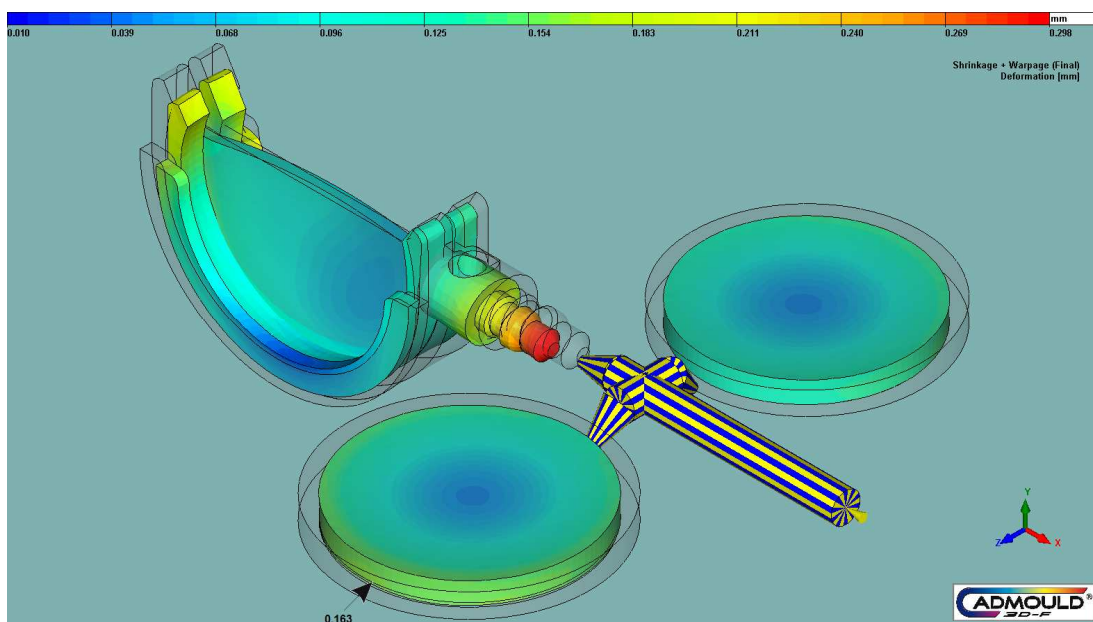
Obr. 3.38: Průběh vstřikovacího tlaku



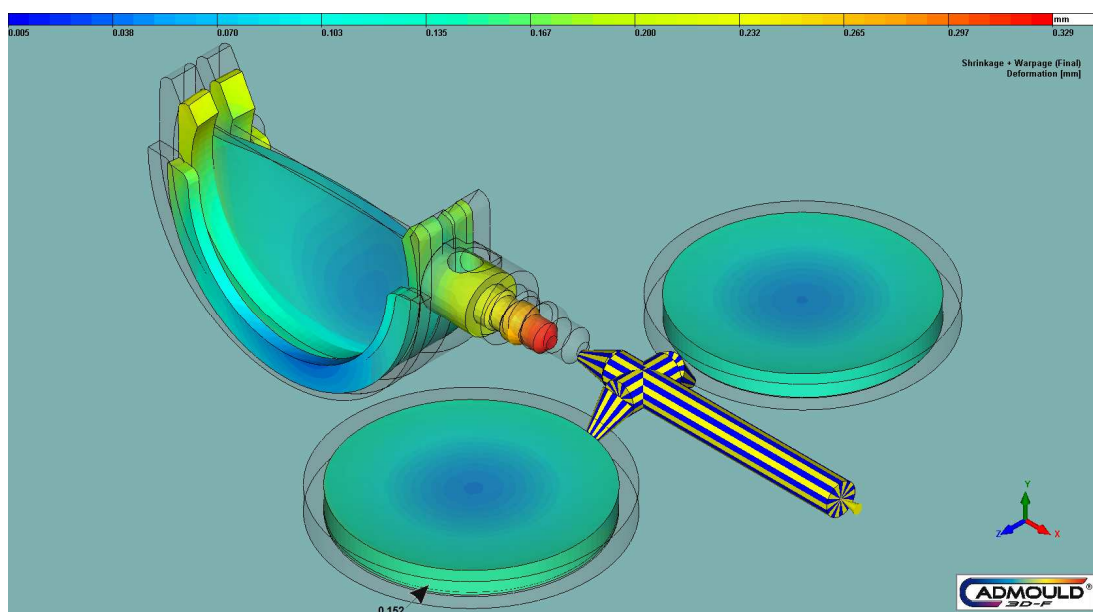
Obr. 3.39: Průběh dotlaku procesu

Po vytvoření sítě výstřiků, temperačních kanálů, nastavení procesních veličin a stanovení materiálu byla spuštěna simulace pro všechny kombinace materiálů výstřiku, způsobů temperace a doby chlazení. Ze simulační analýzy byly zjištěny maximální deformace všech hodnocených variant, avšak tyto maximální deformace se objevily na výsuvném díle, a proto byly zjištěny i lokální deformace, což jsou maximální deformace v dané dvojici výstřiků (dle typu tvarové vložky formy, polymerního materiálu či doby chlazení). Výsledné maximální i lokální deformace výstřiků jsou uvedeny na

obr. 3.40 až 3.48 s desetinásobným zvětšením (včetně označením místa výskytu lokálních deformací) a hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.7.

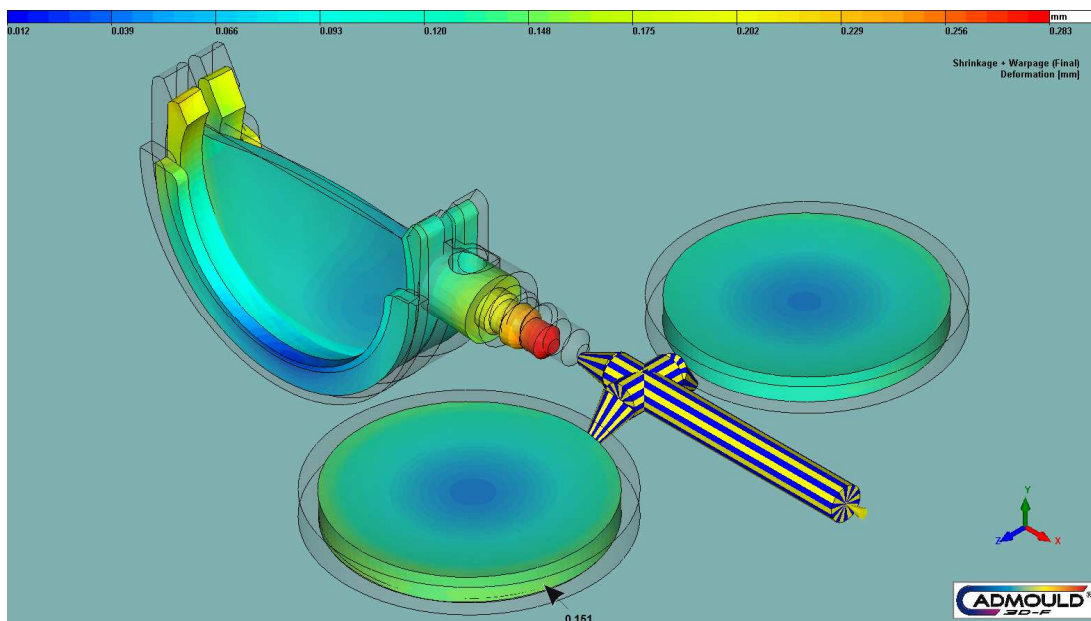


Obr. 3.40: Celková deformace výstřiků PP z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.

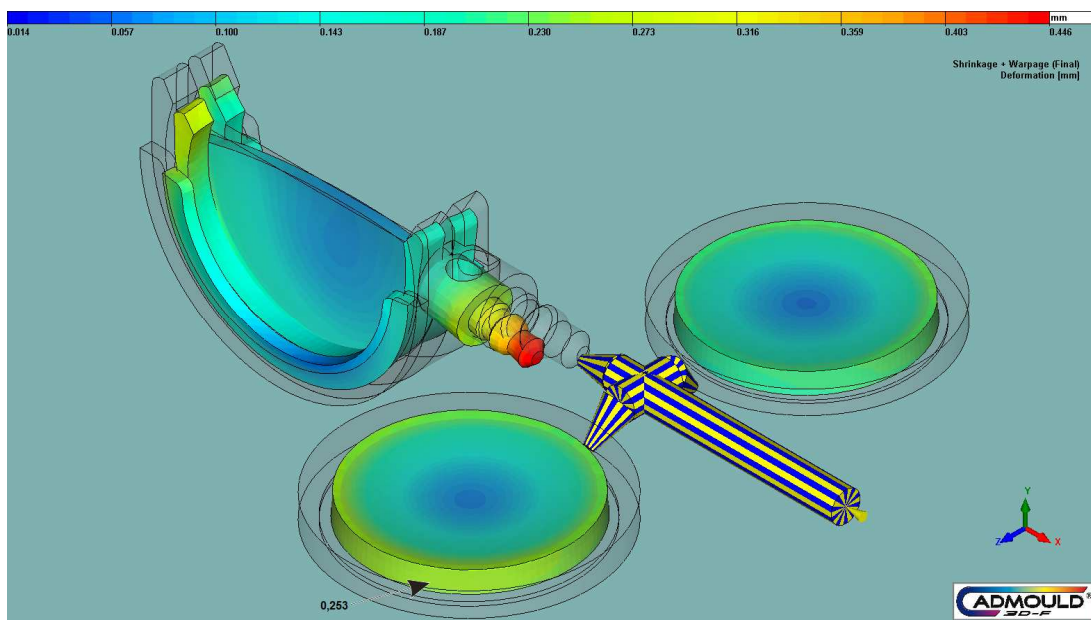


Obr. 3.41: Celková deformace výstřiků PP z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.

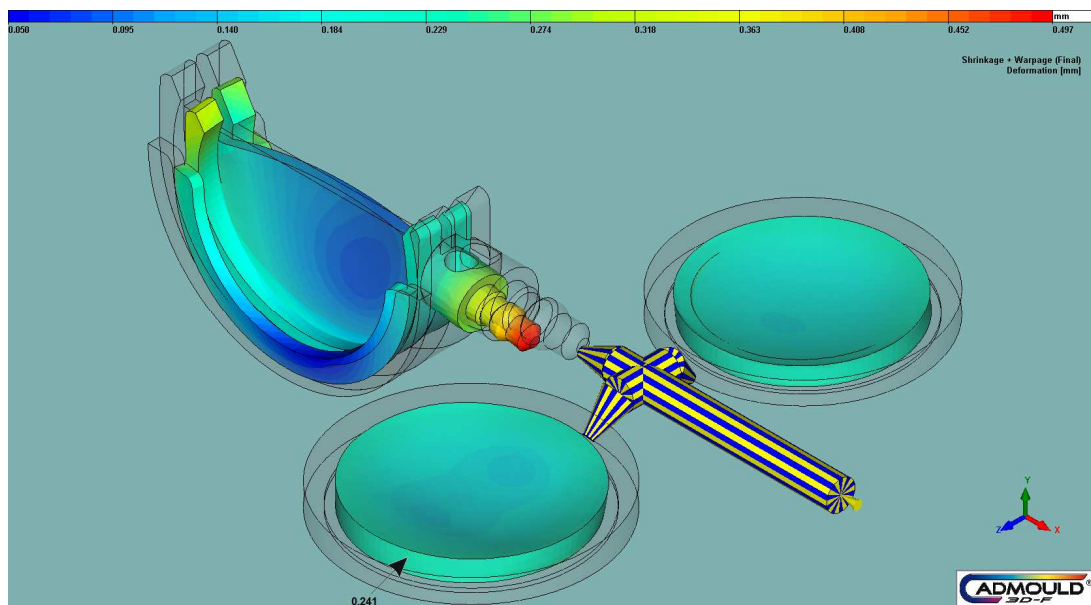




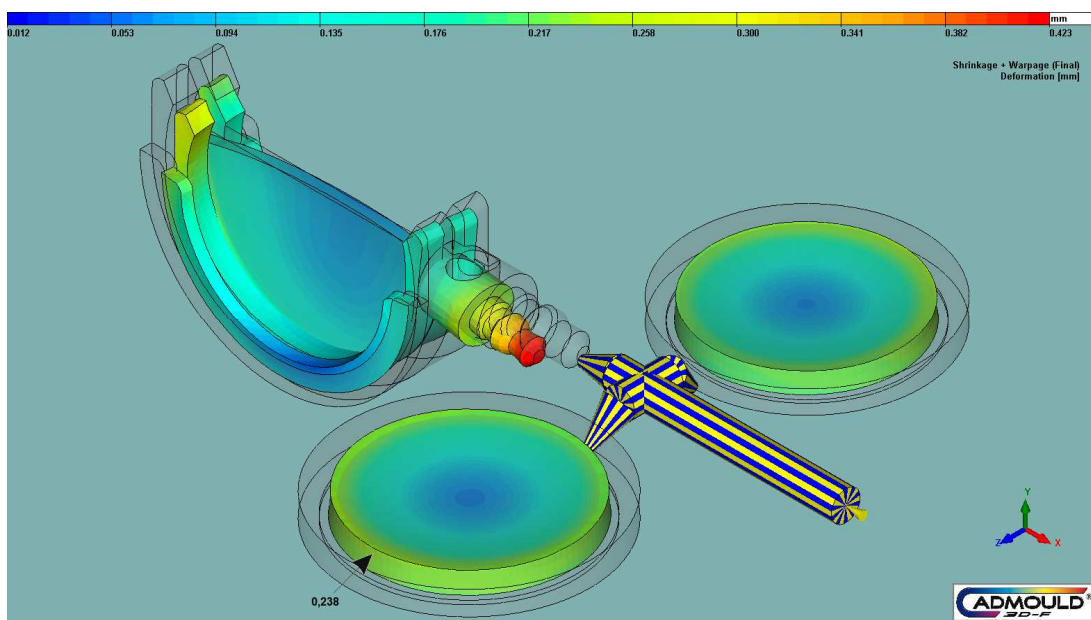
Obr. 3.42: Celková deformace výstřiků PP z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.



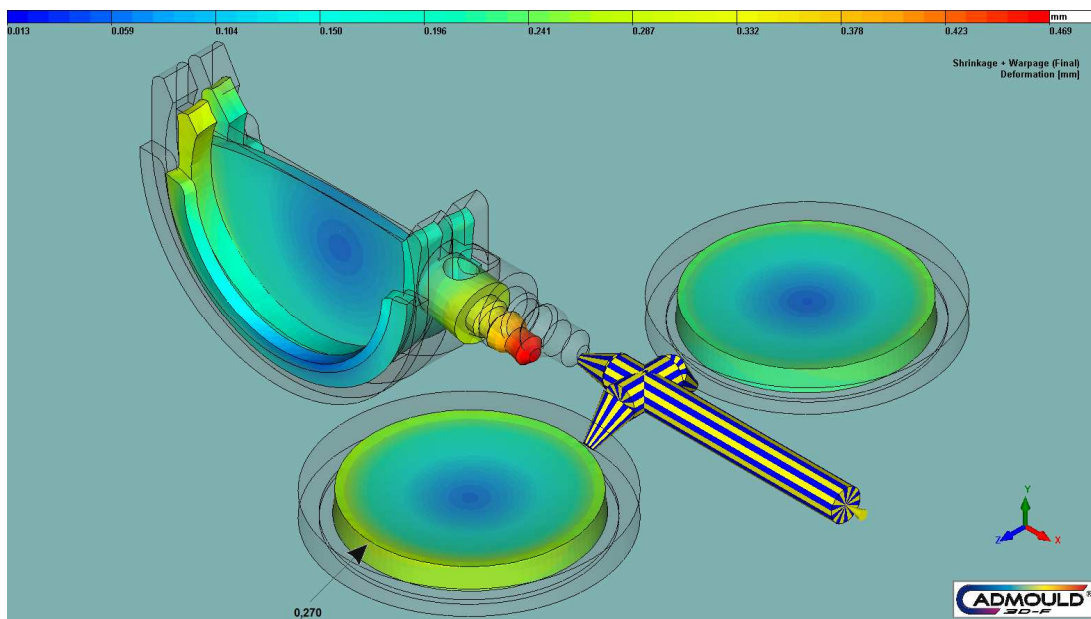
Obr. 3.43: Celková deformace výstřiků PA z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.



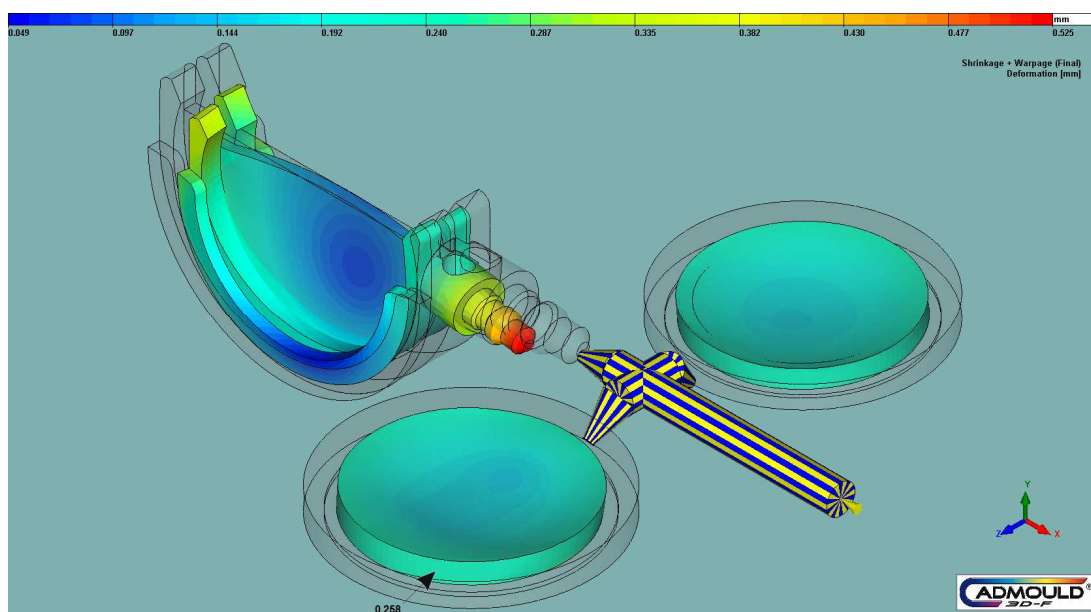
Obr. 3.44: Celková deformace výstřiků PA z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.



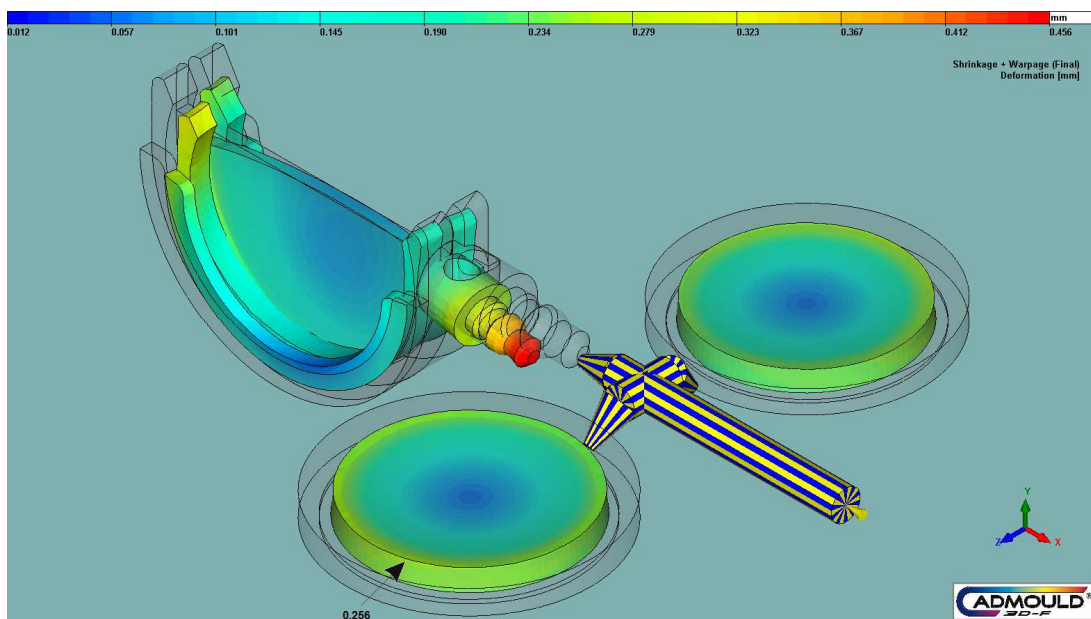
Obr. 3.45: Celková deformace výstřiků PA z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.



Obr. 3.46: Celková deformace výstřiků PA z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při době chlazení  $t_{ch}=4$  s.



Obr. 3.47: Celková deformace výstřiků PA z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při zkrácené době chlazení  $t_{ch}=4$  s.



Obr. 3.48: Celková deformace výstřiků PA z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při zkrácené době chlazení  $t_{ch}=4$  s.

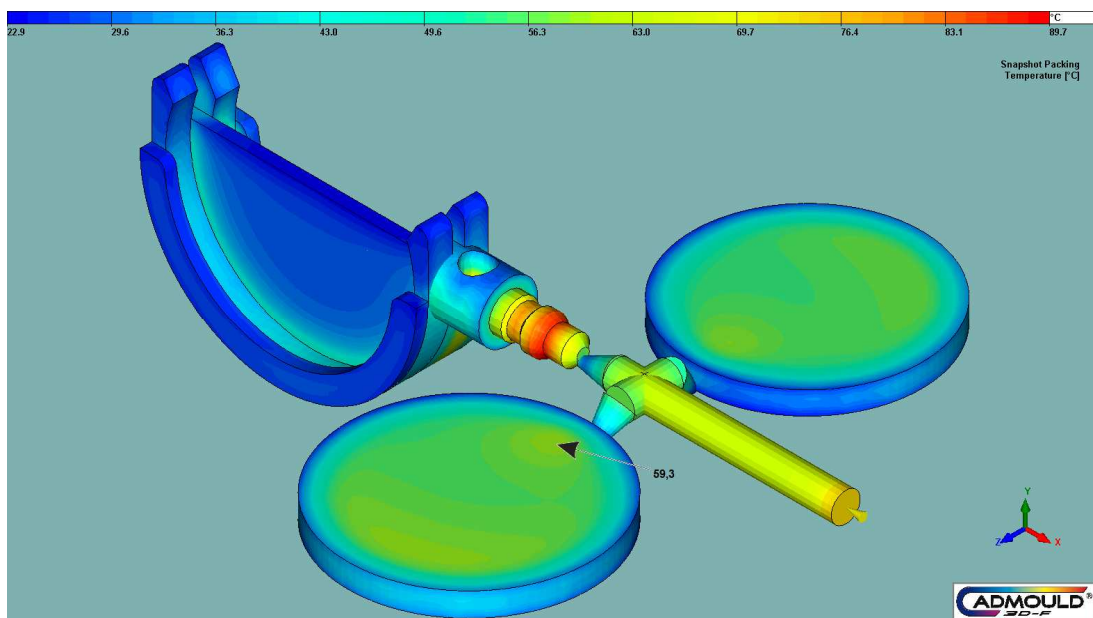
Tab. 3.7: Maximální a lokální deformace výstřiků

Materiál / doba chlazení [s]	Materiál formy	Maximální deformace [mm]	Lokální deformace [mm]
<b>PP/7</b>	Klasická ocel	0,298	0,163
	Laserově slinovaná ocel	0,329	0,152
	Laserově slinovaný bronz	0,283	0,151
<b>PA/7</b>	Klasická ocel	0,446	0,253
	Laserově slinovaná ocel	0,497	0,241
	Laserově slinovaný bronz	0,423	0,238
<b>PA/4</b>	Klasická ocel	0,469	0,270
	Laserově slinovaná ocel	0,525	0,258
	Laserově slinovaný bronz	0,456	0,256

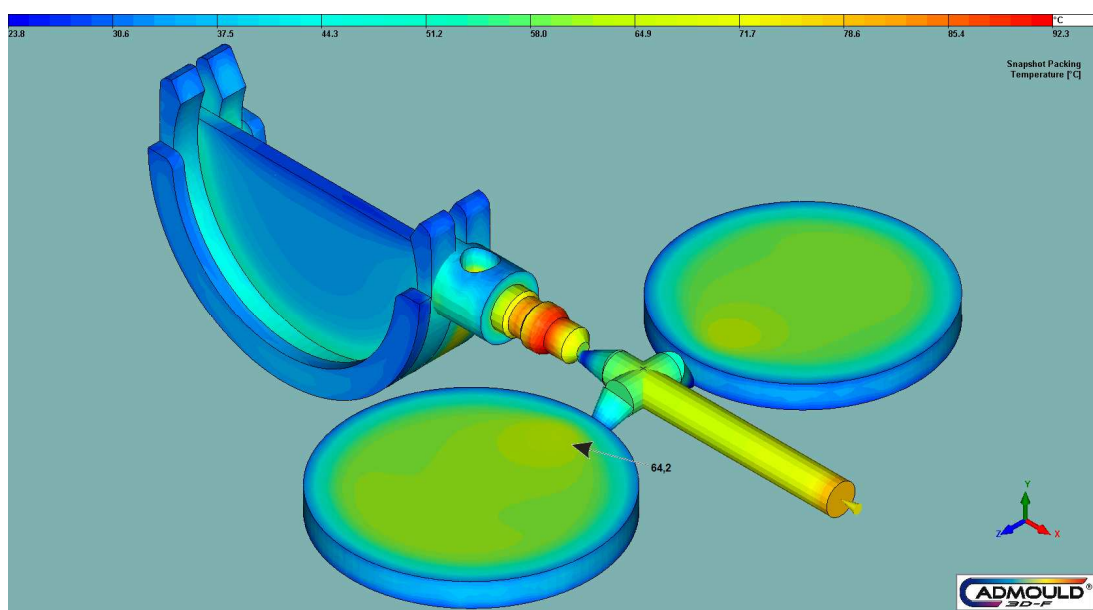
Ze simulační analýzy byla vyhodnocena i výsledná rozložení teplotních polí, včetně maximálních teplot výstřiků. I v tomto případě při určování maximálních teplot byly nejvyšší teploty zaznamenány na výsuvném díle či na vtokové soustavě, a proto byly i zde stanoveny lokální teploty, tedy



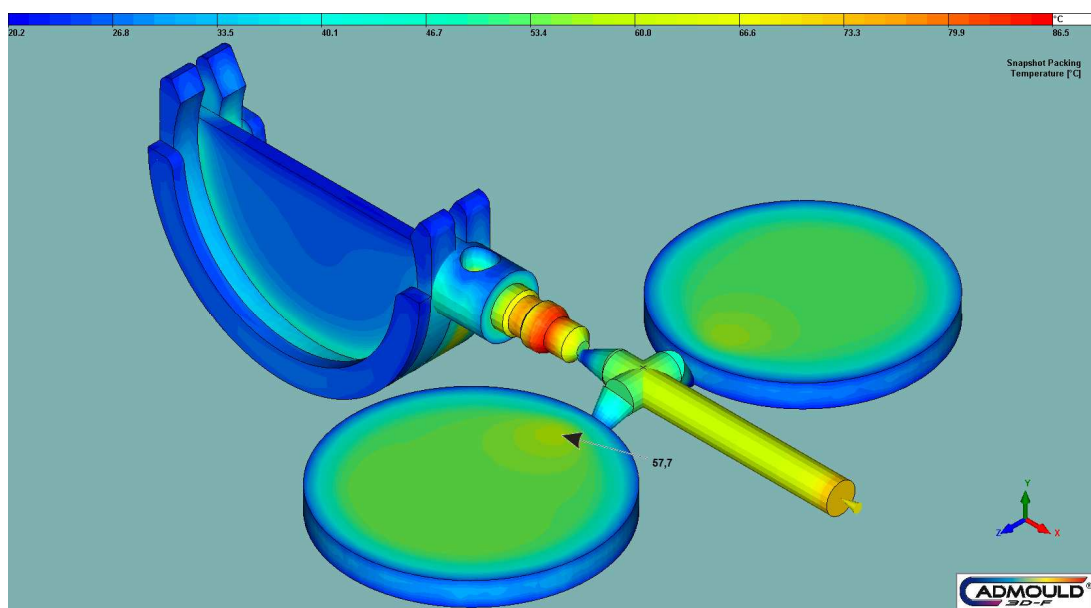
maximální teploty výstřiků. Výsledná rozložení maximálních i lokálních teplotních polí výstřiků (z konce vstřikovacího cyklu) jsou jako v případě deformací uvedena na obr. 3.49 až 3.57 (s označením místa výskytu lokální teploty výstřiku) a hodnoty nejvyšších teplo jsou zaznamenány v tab. 3.8.



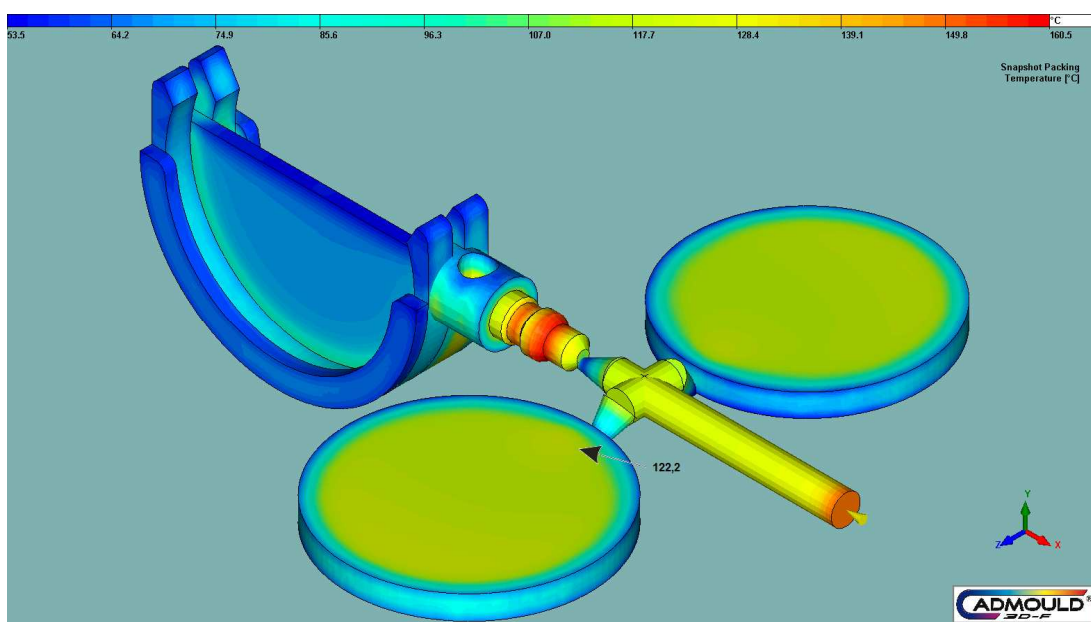
Obr. 3.49: Rozložení teplotního pole výstřiku PP z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.



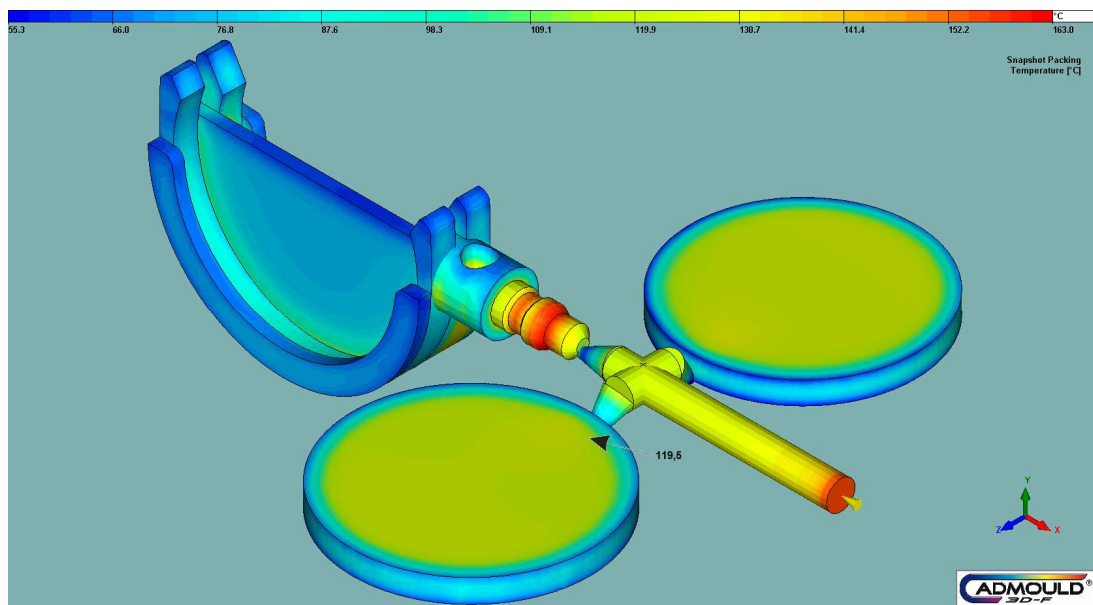
Obr. 3.50: Rozložení teplotního pole výstřiků PP z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.



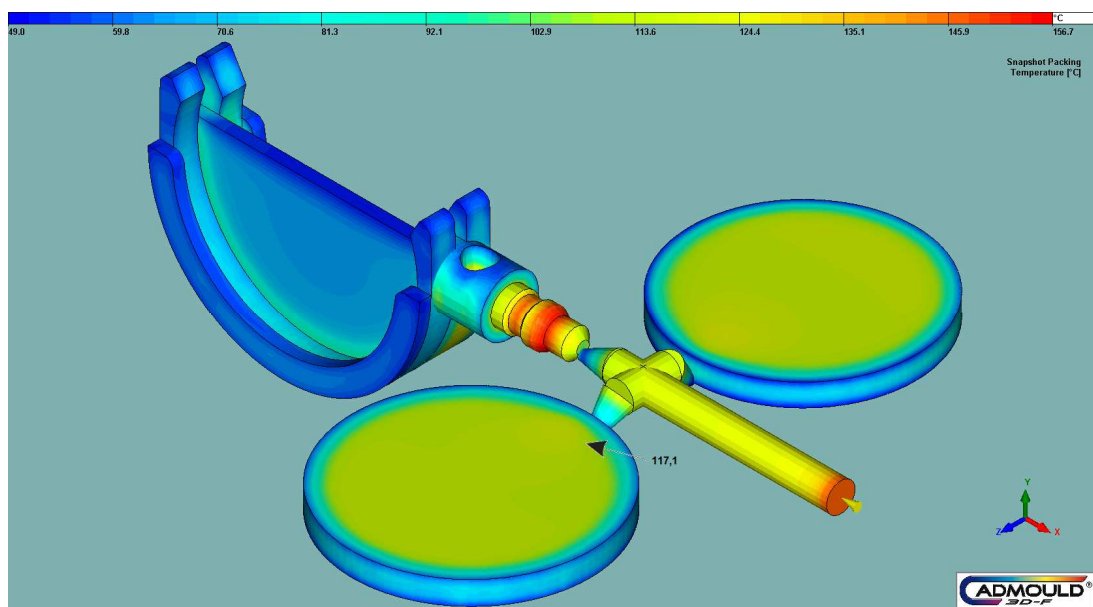
Obr. 3.51: Rozložení teplotního pole výstřiků PP z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.



Obr. 3.52: Rozložení teplotního pole výstřiků PA z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.

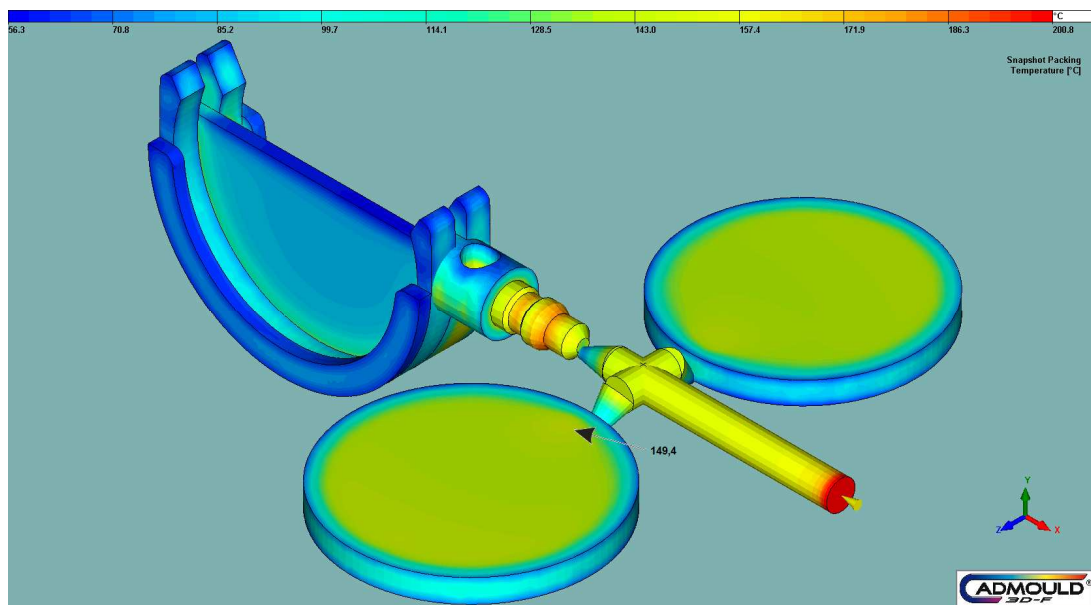


Obr. 3.53: Rozložení teplotního pole výstřiků PA z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.

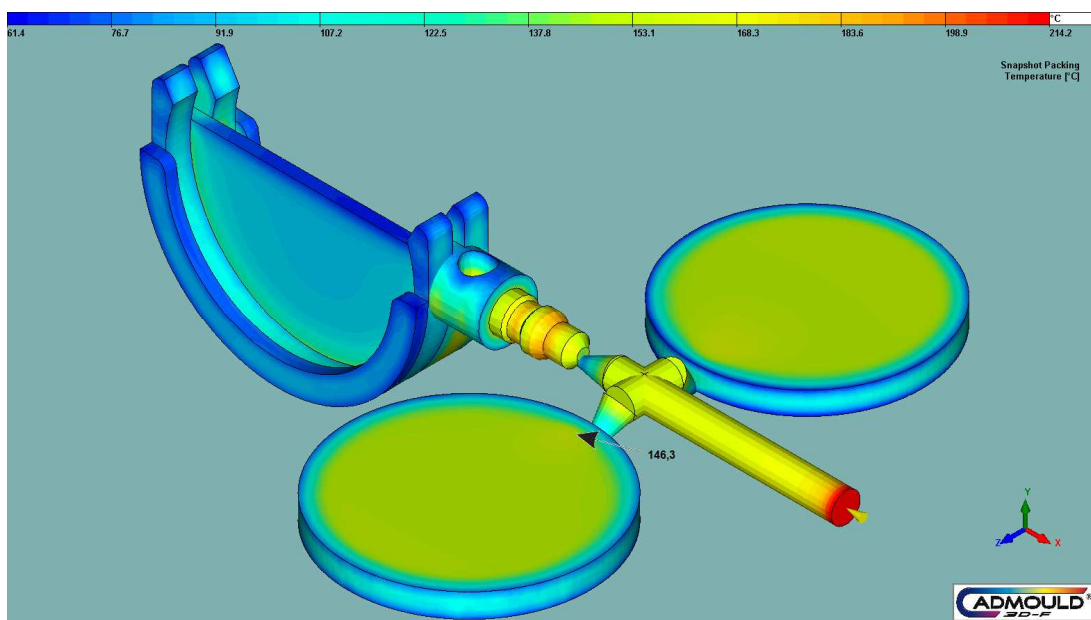


Obr. 3.54: Rozložení teplotního pole výstřiků PA z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při době chlazení  $t_{ch}=7$  s.

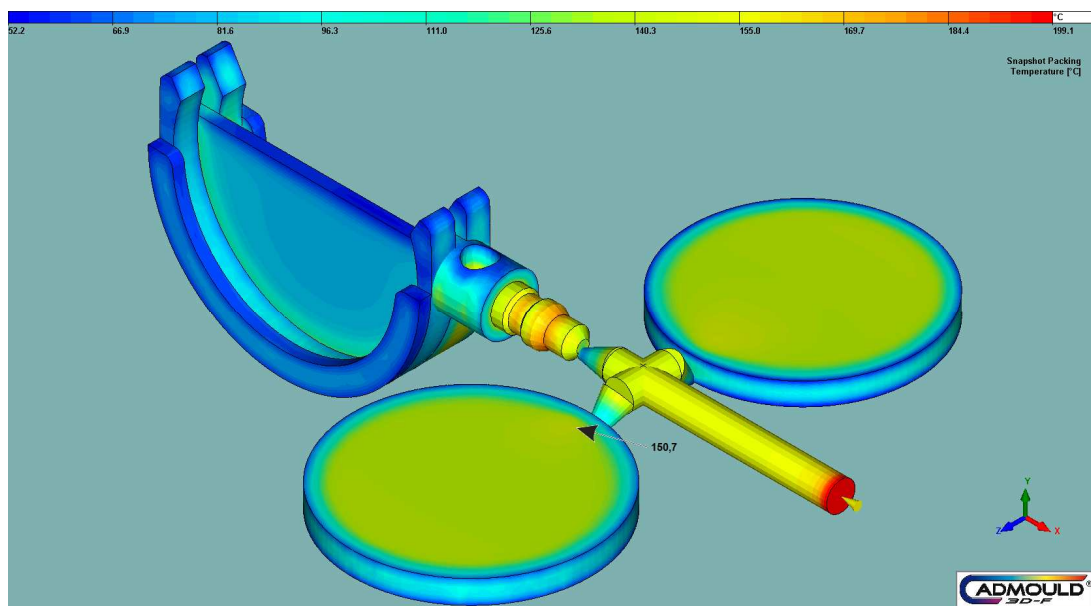




Obr. 3.55: Rozložení teplotního pole výstřiků PA z ocelové vložky s klasickými temperačními kanály při zkrácené době chlazení  $t_{ch}=4$  s.



Obr. 3.56: Rozložení teplotního pole výstřiků PA z ocelové vložky s konformním temperačním systémem při zkrácené době chlazení  $t_{ch}=4$  s.



Obr. 3.57: Rozložení teplotního pole vstřiků PA z bronzové vložky s konformním temperačním systémem při zkrácené době chlazení  $t_{ch}=4$  s.

Tab. 3.8: Maximální teploty vstřiků podle způsobu temperace

Materiál / doba chlazení [s]	Materiál formy	Maximální teplota [°C]	Lokální teplota [°C]
PP/7	Klasická ocel	89,7	59,3
	Laserově slinovaná ocel	92,3	64,2
	Laserově slinovaný bronz	86,5	57,7
PA/7	Klasická ocel	160,5	122,2
	Laserově slinovaná ocel	163	119,5
	Laserově slinovaný bronz	156,7	117,1
PA/4	Klasická ocel	200,8	149,4
	Laserově slinovaná ocel	214,2	146,3
	Laserově slinovaný bronz	199,1	150,7

## 4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE

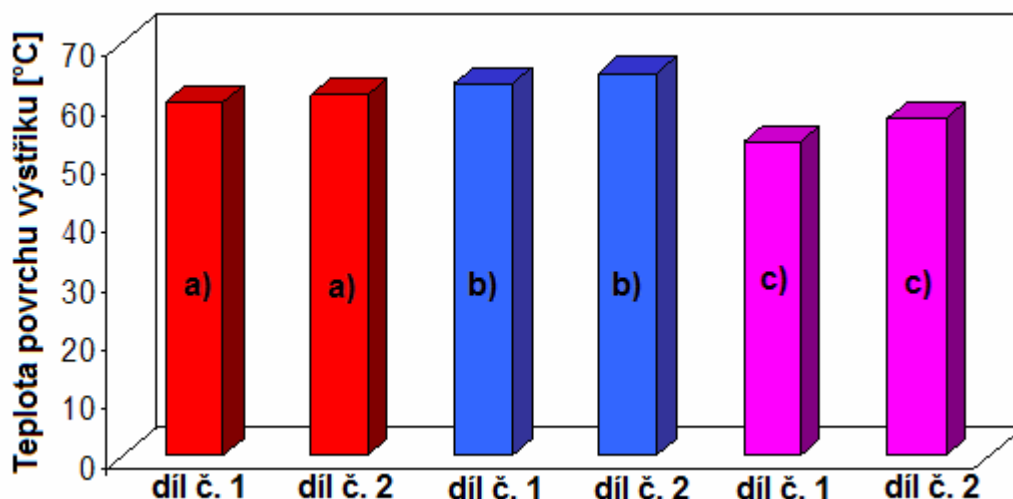
Podobně jako v experimentální části diplomové práce je také vyhodnocení výsledků a jejich diskuse členěno do tří kapitol. V následujících kapitolách je hodnocen vliv způsobu temperace a materiálu vstřikovací formy z hlediska rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku a stupně jejich krystalinity, resp. entalpie tání krystalitů. Ve třetí kapitole je provedeno hodnocení vzniku deformací a teplotních polí získaných simulační analýzou.

### 4.1 Vyhodnocení teplotních polí na výstřiku

Pro zhodnocení účinnosti konformního způsobu temperace v závislosti na materiálu tvarové vložky formy a jejího porovnání s konvenčním temperačním prostředkem bylo provedeno experimentální měření rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku bezprostředně po otevření formy a vyjmutí výstřiků. Hodnocení bylo provedeno z hlediska způsobu temperace a materiálu formy pro PP a PA s dobou chlazení 7 s, příp. zkrácenou dobou chlazení 4 s a dosažené hodnoty teplot, včetně průměrných maximálních teplot jednotlivých výstřiků, jsou uvedeny v tab. 3.4.

- Při hodnocení teplotních polí na výstřiku z PP na obr. 3.9 až obr. 3.11, resp. obr. P1 až P9 (viz příloha 1), lze konstatovat, že oproti výstřikům z konvenční ocelové formy s vrtanými temperačními kanály je u ocelové i bronzové slinované tvarové vložky s konformní temperací rovnoměrnější rozložení teplotních polí u obou výstřiků současně. Oproti tomu při posuzování maximálních teplot výstřiků (viz obr. 4.1) s ohledem na jejich rozptyl, jenž je vyjádřen směrodatnou odchylkou, došlo i přes optimalizaci temperačních kanálů u ocelové slinované vstřikovací formy k nižšímu odvodu tepla v porovnání s konvenčním temperačním způsobem, tedy teploty výstřiků po vyjmutí z formy byly vyšší než u výstřiků z ostatních typů forem. Vzhledem k nízké tepelné vodivosti martenzitické oceli [51] by tak mohl být v tomto případě potlačen vliv optimalizovaného temperačního kanálu při odvodu tepla z malého výstřiku. U bronzové slinované formy s optimalizovaným temperačním kanálem došlo nejen k rovnoměrnému rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku, ale také ke

zvýšení odvodu tepla v porovnání s ostatními způsoby, tj. při srovnání s klasickou ocelí o 9% a v případě slinované oceli o 14%. Avšak je důležité podotknout, že u výstřiků z bronzové slinované tvarové vložky je směrodatná odchylka v případě dílu č. 2 výraznější (což je způsobeno vyšší naměřenou teplotou u třetího měřeného vzorku oproti ostatním teplotám výstřiků).



Obr. 4.1: Maximální teploty výstřiků z PP v závislosti na způsobu temperace

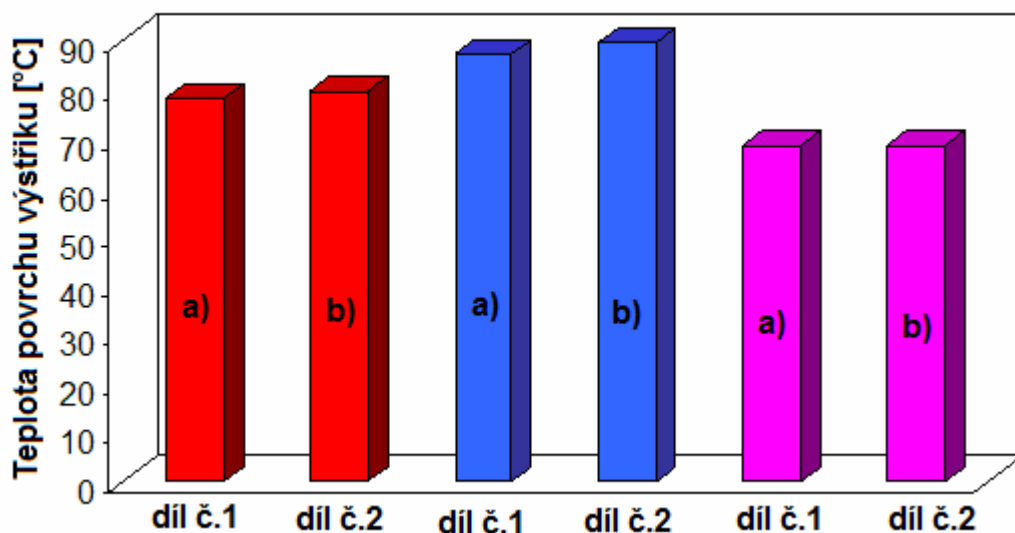
a) ocelová forma s konvenční chlazením

b) laserově slinovaná ocelová forma s konformním chlazením

c) laserově slinovaná bronzová forma s konformním chlazením

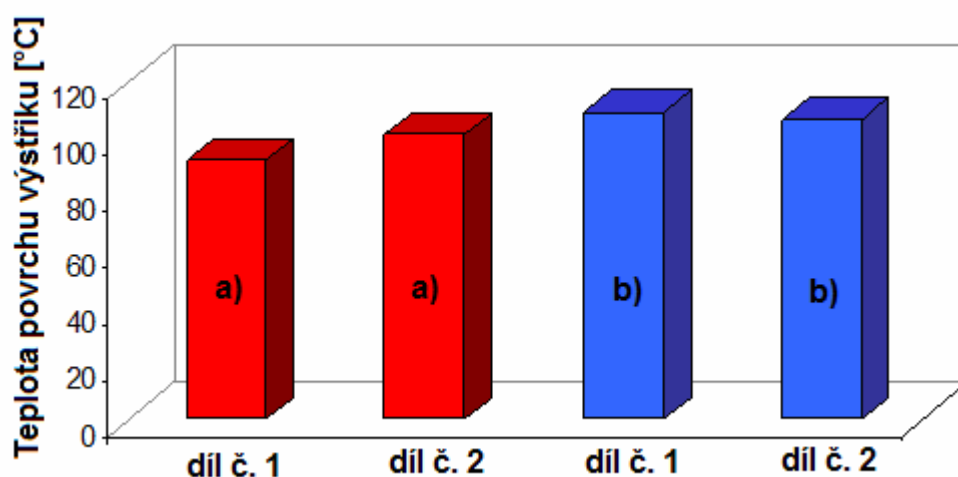
- Rozložení teplotních polí na výstřiku z PA bylo hodnoceno i při zkrácené době chladnutí výstřiků, kdy ovšem neproběhlo termovizní měření u výstřiků z bronzové slinované formy v důsledku jejich deformace při vyjímání (viz kap. 3.1). Ze záznamů termokamery na obr. 3.12 až obr. 3.16, resp. obr. P10 až P24 (viz příloha 1), lze shledat, že je podobně jako u PP rovnoměrnější rozložení teplotních polí v případě výstřiků ze slinovaných forem s konformním chlazením mimo výstřiků z ocelové slinované formy vyráběné se zkrácenou dobou chlazení. I zde jsou hodnoty maximálních teplot výstřiků (viz obr. 4.2 a obr. 4.3), s ohledem na jejich rozptyl, vyšší v případě ocelové slinované formy a vyšší odvod tepla je tak docílen v bronzové slinované formě v porovnání s ostatními způsoby, tj. při porovnání s klasickou ocelí o 13% a v případě slinované oceli o 22%. Dochází tak u této formy z hlediska odvodu tepla z výstřiku

jak z PP, tak i PA nejen k vlivu optimalizovaného temperačního kanálu, ale také k zvýšení odvodu tepla z důvodů vyšší tepelné vodivosti materiálu Direct Metal 20 [52] oproti nástrojové oceli [53] či slinované martenzitické oceli [51].



Obr. 4.2: Maximální teploty výstřiků z PA při době chlazení 7 s v závislosti na způsobu temperace

- a) ocelová forma s konvenční chlazení
- b) laserově slinovaná ocelová forma s konformním chlazením
- c) laserově slinovaná bronzová forma s konformním chlazením



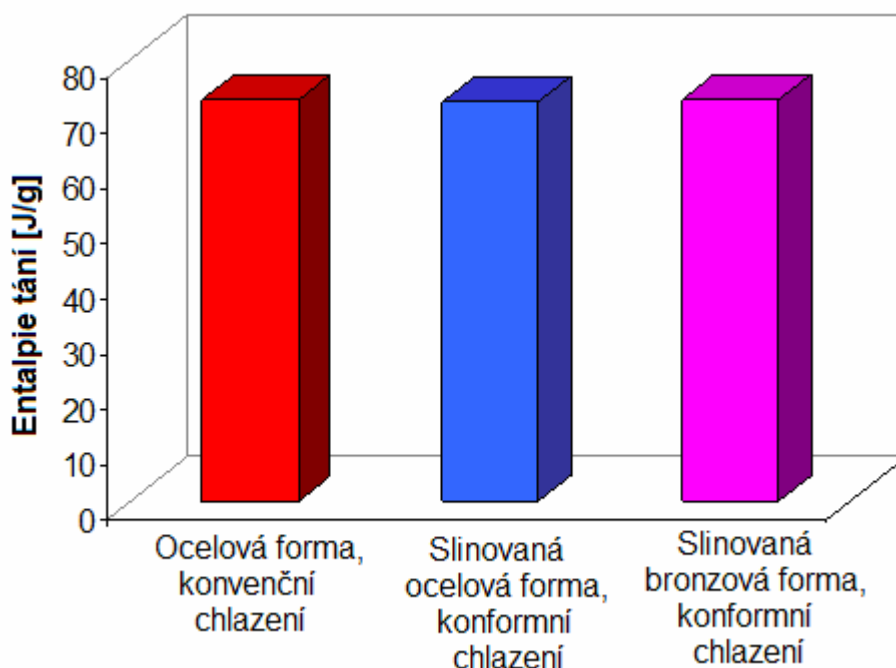
Obr. 4.3: Maximální teploty výstřiků z PA při zkrácené době chlazení 4 s v závislosti na způsobu temperace

- a) ocelová forma s konvenční chlazení
- b) laserově slinovaná ocelová forma s konformním chlazením

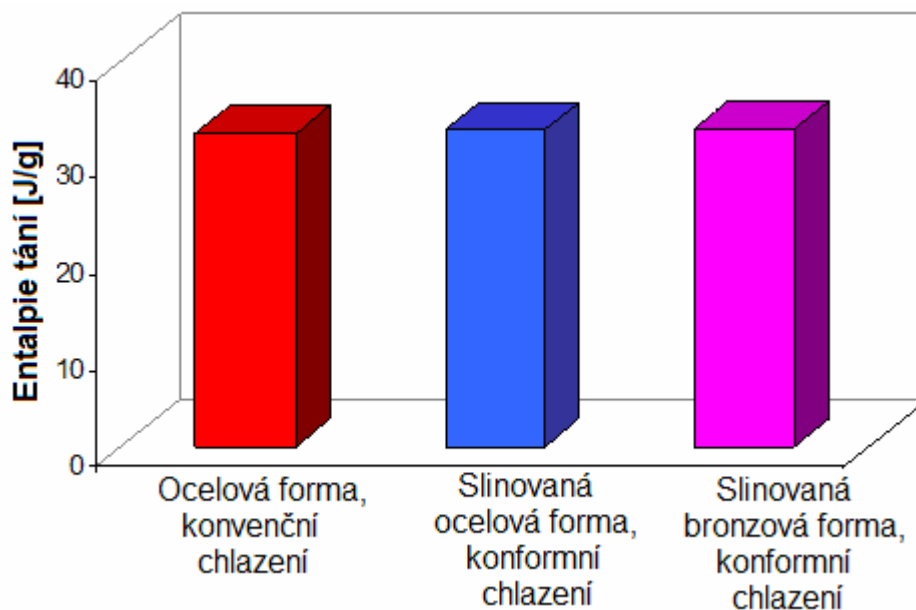
## 4.2 Vyhodnocení stupně krystalinity

Stupeň krystalinity, tedy obsah krystalického podílu výstřiku z PP a PA byl posuzován na základě experimentálně zjištěných hodnot entalpie tání  $\Delta H_m$  [J/g] z hlediska způsobů temperace, materiálů formy a doby chlazení výstřiku při vstřikování.

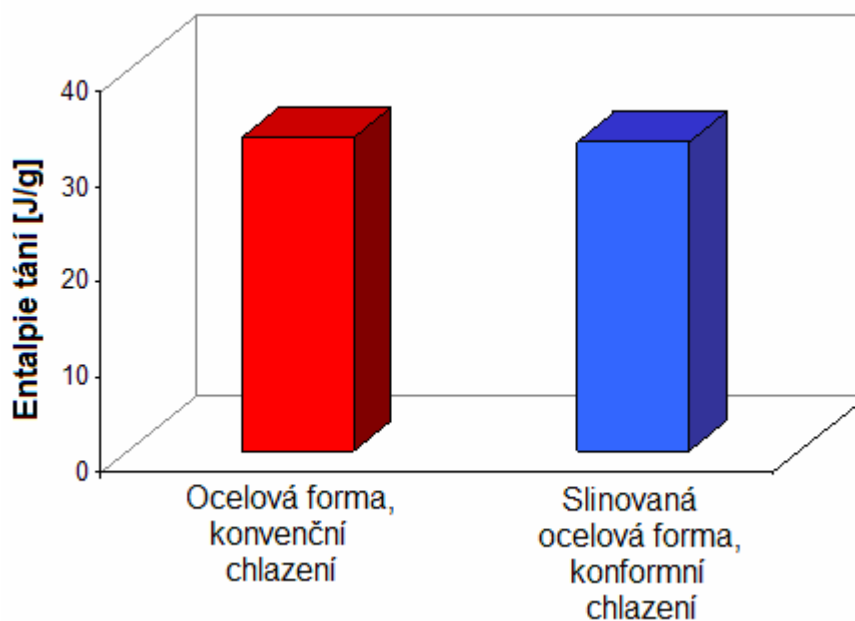
Pro dané experimentální podmínky byla měřena entalpie tání výstřiků z PP i PA u pěti vzorků, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tab. P1 až tab. P3 (příloha 2) a vybrané termogramy z jednoho měření jsou na obr. 3.23 až 3.30. Hodnocením podílu krystalické fáze ve struktuře výstřiku z PP i PA při době chlazení 7 s, resp. zkrácené době chlazení 4 s, na základě velikosti entalpie tání a s ohledem na směrodatnou odchylku, lze říci, že změnou temperačního způsobu (vrtané temperační kanály a konformní temperace) ani materiálem formy (ocel, slinovaná ocel a slinovaný bronz) nebyl zjištěn vliv způsobu chlazení na stupeň krystalinity výstřiku, což je patrné z tab. 3.6 a obr. 4.4 až 4.6.



Obr. 4.4: Stupeň krystalinity u výstřiků z PP



Obr. 4.5: Stupeň krystalinity u výstřiků PA/7



Obr. 4.6: Stupeň krystalinity u výstřiků PA/4

Na velikost rozptylu naměřených hodnot mohl mít vliv způsob úpravy vzorku, čili jeho hmotnost a rozměry, jelikož tak ovlivňují tepelný tok mezi měřeným vzorkem a okolím. K dosažení reprodukovatelnosti hodnot měření je tak důležitá pokud možno stejná hmotnost vzorku a jeho velikost. Vzorky v podobě mikrořezů bylo nutné před měřením upravit tak, aby bylo dosaženo jednotné hmotnosti vzorku cca. 10 mg a velikosti hliníkové kapsle (viz kap. 3.4.1). Toto tepelné namáhání se tak mohlo podílet na velikosti rozptylu



hodnot měření. Nejvýznamnějším podílem na přesnosti měření, resp. rozptylu výsledných hodnot je stanovení inflexních bodů, neboli plochy píky, která je hlavním faktorem určující přesnost vyhodnocení stupně krystalinity výstřiku. Tato plocha se stanovuje především na základě zkušeností integrací stanovené plochy z termogramu. I přes určení inflexních bodů na základě derivační křivky a konzultace s pracovníky laboratoře DSC nelze možnost nepřesnosti stanovené plochy píky jednoznačně vyloučit.

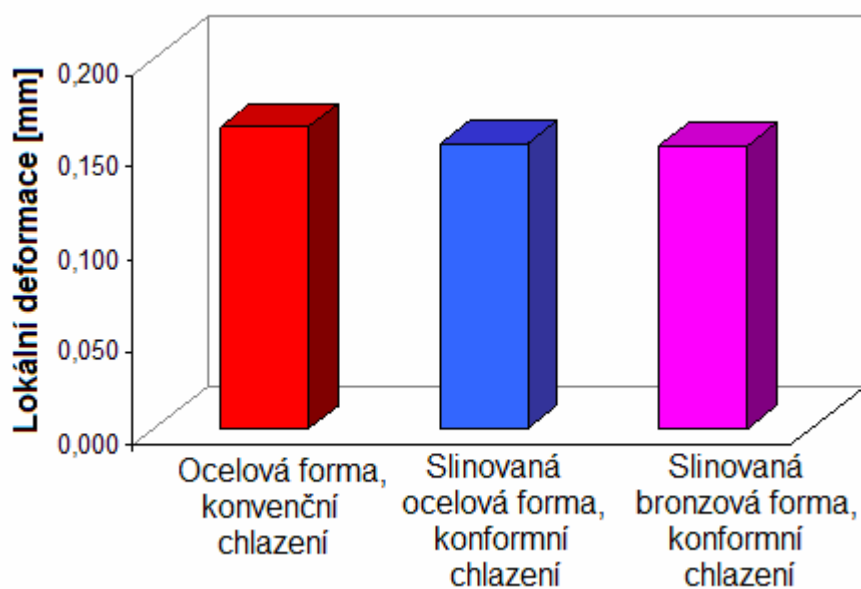
Z experimentálního měření vyplývá, že změnou formy ani temperačního způsobu u takto malého výstřiku ke změnám stupně krystalinity nedochází, avšak zhodnocením metody DSC nelze zkonstatovat, jak byla ovlivněna vnitřní struktura z hlediska velikost sférolitů, což by mohlo mít vliv na výsledné mechanické vlastnosti výstřiku. Tuto skutečnost by bylo možné hodnotit na základě studia výstřiků v polarizovaném světle světelného mikroskopu, avšak v tomto experimentálním výzkumu toto nebylo možné, neboť pro experimentální měření byl použit kopolymer PP, tedy polymer s heterogenní krystalizací, u něhož použití polarizovaného světla pro studium morfologie není vhodné.

#### 4.3 Vyhodnocení simulační analýzy

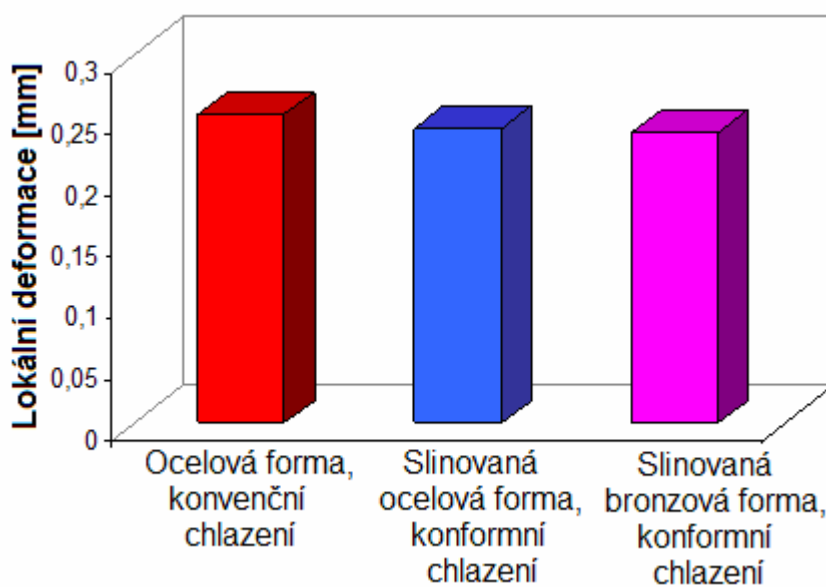
Simulační analýzou byly zjištěny deformace výstřiků a rozložení teplotního pole na povrchu výstřiků v okamžiku po ukončení vstřikovacího cyklu.

- Výsledné deformace jednotlivých výstřiků jsou podle způsobu temperace a materiálu formy uvedeny na obr. 3.40 až obr. 3.48 s desetinásobným zvětšením. V tab. 3.7 je zaznamenána maximální deformace, která byla vždy na výsuvném díle, a lokální deformace, tedy maximální deformace výstřiků (žetonů). U výstřiků z PP, rovněž jako u výstřiků z PA, včetně zkrácené doby chlazení, byla největší deformace z ocelové formy s konvenčně vrtanými temperačními kanály (vzhledem k velikosti výstřiku je zjištěná lokální deformace rozdílná o 7% oproti výstřikům ze slinované oceli a v případě slinované oceli o 6%), zatímco nejmenší deformace byla zjištěna u výstřiků z bronzové slinované formy s konformním temperačním systémem. Při stanovování deformací výstřiků simulační

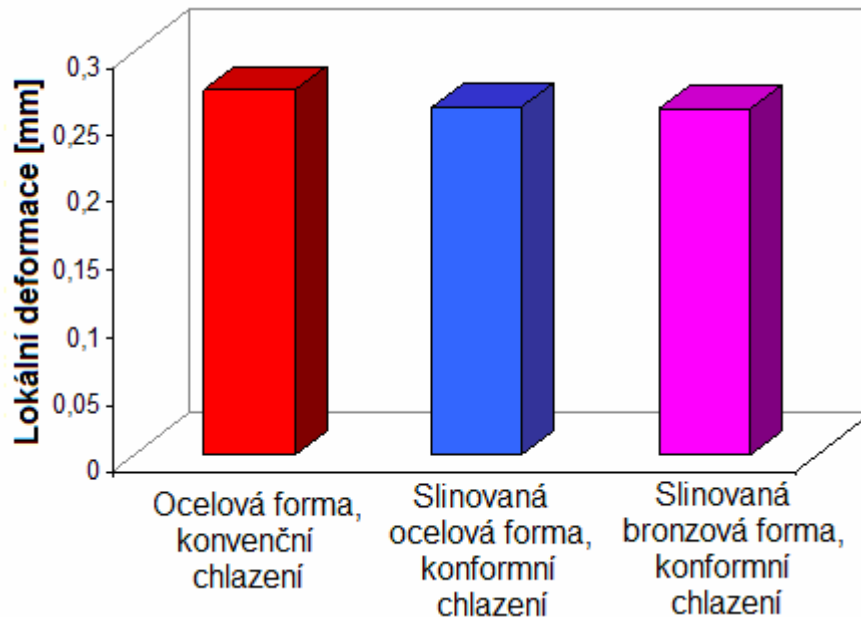
analýzou se tak projevila nejen odlišná tepelná vodivost materiálů forem, ale především z hlediska rovnoměrnějšího odvodu tepla z povrchu výstřiku i vliv konformního temperačního kanálu, který kopíruje tvar dutiny formy, čímž je zajištěna větší teplosměnná plocha s intenzivnějším odvodem tepla.



Obr. 4.7: Maximální deformace na výstřiku z PP



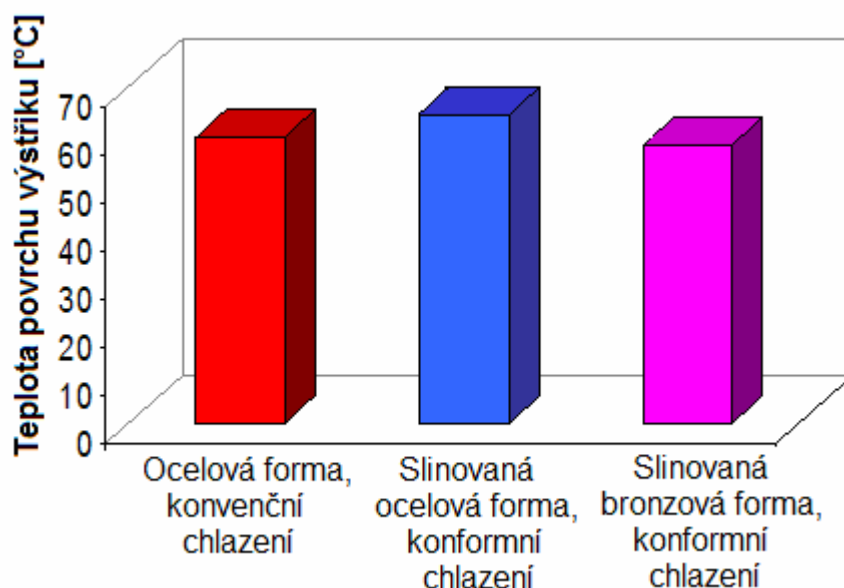
Obr. 4.8: Maximální deformace na výstřiku z PA/7



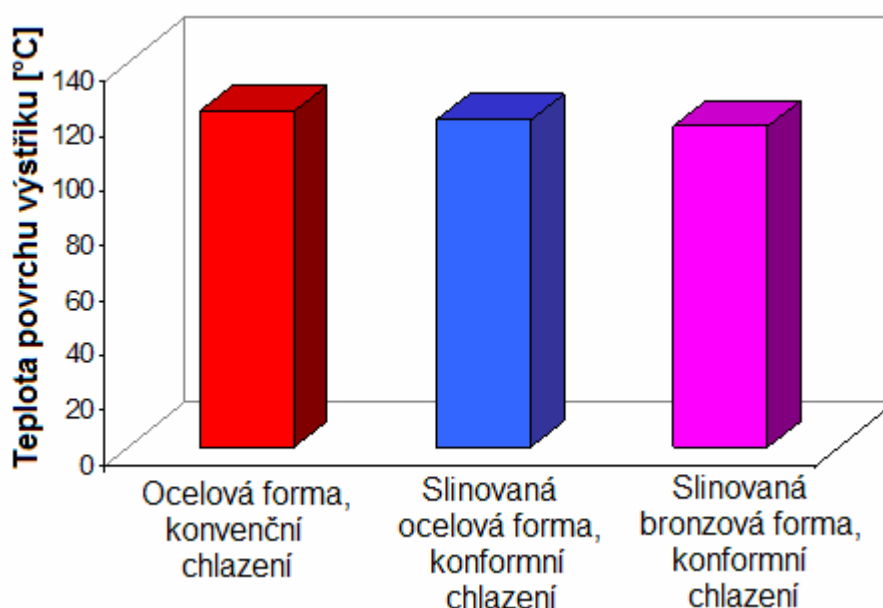
Obr. 4.9: Maximální deformace na výstřiku z PA/4

- Simulační analýzou bylo vyhodnoceno i rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku, avšak pouze v okamžiku po ukončení vstřikování a ochlazení výstřiku na teplotu vyjímání, tedy před otevřením formy. Z tohoto důvodu nelze přímo porovnávat maximální naměřené teploty výstřiků termokamerou a teploty ze simulační analýzy, jelikož teploty výstřiků z termovizního měření jsou nižší vlivem ochlazení na vzduchu při jejich vyjímání z formy a následné manipulaci. Rozložení teplotních polí výstřiků získaných simulační analýzou jsou uvedeny na obr. 3.49 až 3.57 a maximální teplota (na výsuvném díle) s maximální (lokální) teplotou na výstřiku je zaznamenána v tab. 3.8. Při porovnání rozložení teplotních polí je u všech výstřiků patrná vyšší teplota u vtoku, ale tento teplotní rozdíl je minimální. V případě výstřiku PP z ocelové formy s konvenčním temperačním kanálem je zřetelný nejméně rovnoměrný odvod tepla z povrchu výstřiku oproti ostatním analýzám. Avšak stejně jako v případě termovizního měření jsou zjištěny u výstřiku PP z ocelové slinované formy s konformní temperací nejvyšší teploty výstřiků. Při zkrácené době chlazení v bronzové slinované formě u PA je maximální teplota výstřiku nepatrně vyšší oproti výstřikům z ostatních typů forem, jelikož však vlivem hrubého povrchu dutiny nebylo možné tyto výstřiky vyrobit, nelze tuto zjištěnou skutečnost srovnat s reálným chováním výstřiku. Při porovnání teplot výstřiků měřených termokamerou a zjištěných simulací je patrný

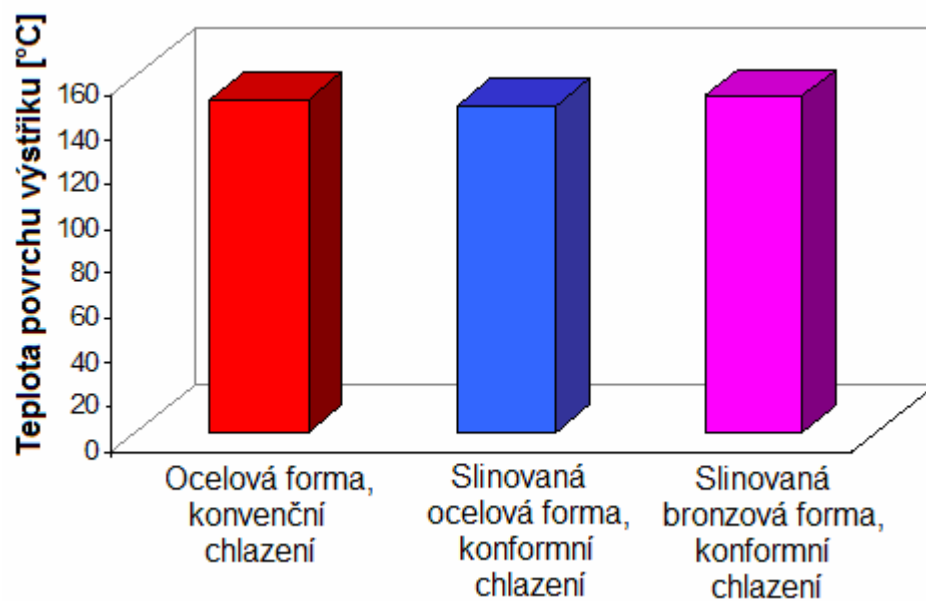
mnohem větší rozdíl u výstřiků PA oproti výstřikům PP. Lze se domnívat, že i přes značnou podobnost vlastností PA Zytel MT409AHS NC010 a PA vybraného z databáze knihovny programu Cadmould, mohlo být chování výstřiků v průběhu vstřikování a následného chladnutí nepatrně odlišné a mohlo tak dojít k zaznamenání vyšších teplot (s přihlédnutím rozdílnost vyhodnocování teplot simulační analýzou a termokamerou) oproti skutečně naměřených hodnotám.



Obr. 4.10: Maximální teplota na výstřiku PP



Obr. 4.11: Maximální teplota na výstřiku PA/7



Obr. 4.12: Maximální teplota na výstřiku PA/4

## 5 ZÁVĚR

Cílem předkládané diplomové práce byla aplikace a zhodnocení vlivu konformního chlazení (temperace) vstřikovacích forem. Jak již bylo v úvodu řečeno, tato diplomová práce doplňuje studie temperačních systémů řešených na katedře strojírenské technologie.

Teoretická část byla zaměřena na význam temperace z hlediska kvality a změn vlastností výstřiku, na stručné seznámení s temperačními prostředky a na teoretické poznatky konformního chlazení.

V experimentální části byl řešen vliv nekonvenčního způsobu odvodu tepla ze vstřikovací formy konformním chlazením na rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku a změn jeho krystalického podílu ve struktuře pomocí metody DSC (při konkrétních materiálech tvarových částí formy, polymerních materiálů a vstřikovacích podmínkách).

Z dosažených výsledků termovizního měření vyplývá malý rozdíl v rozložení teplotních polí při různém způsobu temperace či materiálu. I přesto, že jsou tyto rozdíly nepatrné, lze konstatovat rovnoměrnější rozložení u výstřiků z formy s konformní temperací, především při zkrácené době chladnutí. Jelikož však došlo vlivem drsného povrchu tvarové dutiny formy k deformaci výstřiků PA vyhazovacím systémem, nejsou k dispozici při zkrácené době chladnutí termogramy i pro bronzovou formu s konformní temperací (nelze tak materiál Metal Direct 20 považovat za vhodný pro výrobu slinované formy laserem na čisto). Z hlediska maximálních teplot výstřiků byly zaznamenány u ocelové slinované formy (martenzitická ocel) ve všech případech vyšší teploty, než u formy z nástrojové oceli s vrtanými temperačními kanály, což mohla způsobit vzhledem k rozměru a složitosti dílu především nízká tepelná vodivost martenzitické oceli oproti nástrojové oceli a došlo tak k potlačení vlivu optimalizovaných temperačních kanálů slinované formy.

Při posuzování vlivu konformního chlazení na stupeň krystalinity nebyla zaznamenána žádná změna. Velikost směrodatných odchylek mohla být zapříčiněna, jak již bylo uvedeno v kap. 4.2 přípravou vzorků a především způsobem vyhodnocování vzniklého termogramu.

Z vyhodnocení výsledných deformací výstřiků simulační analýzou vyplývá, že vlivem konformního temperačního kanálu, který kopíruje tvarovou dutinu formy, tak dochází k rovnoměrnějšímu odvodu tepla z celého výstřiku a je tak zaznamenána menší deformace, než v případě konvenčního způsobu temperace. Nejmenší deformace je u výstřiků z bronzové slinované formy, jelikož na vlivu optimalizovaných kanálů se podílí i intenzivnější odvod tepla v důsledku vyšší tepelné vodivosti bronzu [52]. Lze předpokládat, že by v případě většího a složitějšího dílu bylo dosaženo výrazně větších rozdílů deformací i intenzity chlazení při využití konformního chlazení oproti konvenční temperaci. V případě maximálních teplot na výstřiku po ukončení procesu vstřikování, byly potvrzeny poznatky z měření termokamerou, jelikož i v tomto případě byly teploty výstřiků u obou polymerních materiálů z ocelové slinované formy nejvyšší. V případě ostatních výstřiků byly nejnižší teploty z bronzové slinované formy, mimo výstřiků PA se zkrácenou dobou chlazení. Avšak tyto poznatky simulační analýzy nelze podložit reálným měřením teplot výstřiků termokamerou.

Z experimentálního měření vyplývají minimální změny rozložení teplotních polí a naměřených maximálních teplot výstřiků. Proto by pro další směr výzkumu bylo z hlediska konečné kvality výrobku zajímavé využít konformní chlazení ve vstřikovací formě pro rozměrově i tvarově náročnější díl. Přestože metodou DSC nebyly prokázány žádné změny krystalického podílu výstřiku, nelze na základě této metody konstatovat, že nedošlo ke změnám molekulární struktury (velikosti, tvaru a uspořádání makromolekul) a vlastností výstřiků. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést v případě konformního chlazení u výstřiků z neplněných homopolymerů, tj. polymerů s homogenní nukleací při krystalizaci taveniny, např. hodnocení struktury v polarizovaném světle nebo pro posouzení změny vlastností výstřiku mechanické zkoušky.



## LITERATURA

- [1] NEUHÄSL, E.: Požadavky na kvalitu a reálné možnosti technologie vstřikování, In: MM Průmyslové spektrum 2010/1, s. 30.
- [2] KREBS, J.: Teorie a technologie zpracování plastů. Liberec: TU v Liberci, 1981. ISBN 55-823-80.
- [3] SOVA, A. - KREBS, J.: Termoplasty v praxi. Praha : Verlag Dashöfer Nakladatelství spol. s r.o. v Praze, 1999-2004, ISBN 80-86229-15-7.
- [4] BĚHÁLEK, L.: Teplotní analýza vstřikovacích forem s ohledem na kvalitu plastových výrobků. In Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25. výročí katedry tváření a plastů, 14.-15. září 2004. Liberec : TU v Liberci, 2004, s. 29-36. ISBN 80-7083-856-6.
- [5] <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Morfologie.pdf> (leden 2010)
- [6] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/p4/morfologie3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p4/morfologie3.pdf) (duben 2010).
- [7] LEDNICKÝ, F.: Mikroskopie a morfologie polymerů. Díl 2. Morfologie polymerů. Liberec: TU v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-487-0.
- [8] ČERMÁK, R.: Injection-moulded  $\alpha$ - and  $\beta$ -polypropylenes: I. Structure vs. processing parameters. In: European Polymer Journal 41 (2005), s. 1838-1845.
- [9] <http://tpe-u.com/tpu/emea/en/docguard/A1120.pdf?docId=47374> (duben 2010)
- [10] Příručka formy pro zpracování plastů. Díl 2. – Vstřikování termoplastů. In 9. celostátní onference „Stroje 99“. Brno : Uniplast Brno, 1999, s. 39-63.
- [11] [http://www.lasergenerieren.de/de/galerie/galerieuebersicht\\_1.php](http://www.lasergenerieren.de/de/galerie/galerieuebersicht_1.php) (září 2009)
- [12] ZEMAN, L.: Cesty ke zvyšování účinnosti výměny tepla mezi formou, výstřikem a temperačním systémem formy. In 19. mezinárodní konference. Plasty – konstrukční materiály a jejich zpracování. Praha: Plast form service s. r. o., 2009, s. 203-212. ISSN 1213-2640
- [13] [http://www.amcz.cz/editor/image/produkty\\_kategorie1/File/Temperaky/STM-W.pdf](http://www.amcz.cz/editor/image/produkty_kategorie1/File/Temperaky/STM-W.pdf) (duben 2010)

- [14] [http://www.amcz.cz/editor/image/produkty\\_kategorie1/File/Temperaky/TAB-3.pdf](http://www.amcz.cz/editor/image/produkty_kategorie1/File/Temperaky/TAB-3.pdf) (únor 2010)
- [15] RŮŽIČKOVÁ, Z.: 3D nástroj pro simulaci vstřikování plastů, In: MM Průmyslové spektrum 2009/10, s. 58.
- [16] BĚHÁLEK, L.: Speciální temperační prostředky, In: SOVA, A. - KREBS, J.: Termoplasty v praxi. Praha : Verlag Dashöfer Nakladatelství spol. s r.o. v Praze, 1999-2004, ISBN 80-86229-15-7.
- [17] <http://www.carttech.com/news.aspx?id=1318> (říjen 2009)
- [18] <http://ranque.hilsch.sweb.cz/ranquehilsch.dwt> (listopad 2009)
- [19] POUPA, T.: Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Rangue–Hilsch vírovou trubicí. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2005.
- [20] BOBEK, J.: Aplikace tepelné trubice ve fázi chlazení procesu vstřikování polypropylenu. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2007.
- [21] [http://www.dsm.com/en\\_US/html/dep/alternativecoolingdevices.htm](http://www.dsm.com/en_US/html/dep/alternativecoolingdevices.htm) (říjen 2009)
- [22] WESTHOFF, R.: Kontrufolgende Temperierung auf dem Vormarsch, In: Kunststoffe 8/2006, s. 24-26.
- [23] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/tzn/c6/desky.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c6/desky.pdf) (leden 2010)
- [24] <http://www.mecobond.de/english/index.htm> (duben 2010)
- [25] HEJNA, M.: Tepelné vložky ve vstřikovacích formách a jejich vliv na mechanické vlastnosti krystalických plastů. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2004.
- [26] <http://www.contura-mtc.de/download/flyer.pdf> (červen 2009)
- [27] ROZKOŠNÝ, L.: Konformní chlazení vstřikovacích forem a jeho přínos pro optimalizaci vstřikování plastů. In 19. mezinárodní konference. Plasty – konstrukční materiály a jejich zpracování. Praha: Plast form service s. r. o., 2009, s. 213-221. ISSN 1213-2640
- [28] <http://www.lasergenerieren.de/de/3dlasergravus.php> (listopad 2009)
- [29] <http://www.konformnichlazení.cz/konformni-chlazení.html> (září 2009)

- [30] [http://www.bkl-lasertechnik.de/pdf/BKL\\_Flyer\\_Fakuma\\_2009\\_d.pdf](http://www.bkl-lasertechnik.de/pdf/BKL_Flyer_Fakuma_2009_d.pdf)  
(říjen 2009)
- [31] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/tzn/c6/contura.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c6/contura.pdf) (listopad 2009)
- [32] <http://www.dencker.de/LaserFUSING.htm> (prosinec 2009)
- [33] <http://www.impetus-engineering.de/go/downloads/german.html>
- [34] [http://www.time-compression.com/library/109/EOS\\_WP\\_DMLS2\\_ENG\\_12.pdf](http://www.time-compression.com/library/109/EOS_WP_DMLS2_ENG_12.pdf) (prosinec 2009)
- [35] <http://www.konformnichlazení.cz/galerie.html> (říjen 2009)
- [36] <http://dmls.cz/> (září 2009)
- [37] <http://www.innomia.cz/dmls-fcz.htm> (září 2009)
- [38] MULLER-SCHMETZ, T.: Glänzendes Ergebnis, In: Plast Verarbeiter 06/2005, s.28-29.
- [39] <http://www.technickytydenik.cz/detail.php?action=show&id=5101&mark=konformn%ED%20chlazen%ED> (leden 2010)
- [40] MAL, G.: Weg vom Kühlkanal, In: Plast Verarbeiter 02/2006, s. 72-73.
- [41] <http://www.carkahilkutec-gmbhcarkade/gfx/user/Allrounder3200834777001090915304.pdf> (březen 2010).
- [42] materiálový list PP Sabic PP 56M10.
- [43] materiálový list PA MT409AHS NC010.
- [44] LOUFEK, J.; LANGPAUL, J.: Aplikace nových metod do praxe – Moldflow, termokamera. In Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25. výročí katedry tváření a plastů, 14.-15. září 2004. Liberec : TU v Liberci, 2004, s. 67-75. ISBN 80-7083-856-6.
- [45] <http://www.termovize.com/princip-termovize> (březen 2010)
- [46] Manuál termovizní kamery ThermoCAM P65
- [47] VANÍČEK, J.: Metody termické analýzy. Přednášky. FT TUL. Liberec: TU v Liberci, 2006.
- [48] <http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/DSCper.htm> (září 2009)
- [49] [http://lww.kt.dtu.dk/~vigild/2005\\_04\\_melitek/dsc.htm](http://lww.kt.dtu.dk/~vigild/2005_04_melitek/dsc.htm) (listopad 2009)
- [50] <http://www.cadmould.cz>
- [51] materiálový list MS1 – Martenzitická ocel (DIN 1.2709)

- [52] materiálový list MD20 – Metal Direct 20
- [53] materiálový list nástrojové oceli (DIN 1.2343)

# **PŘÍLOHY**

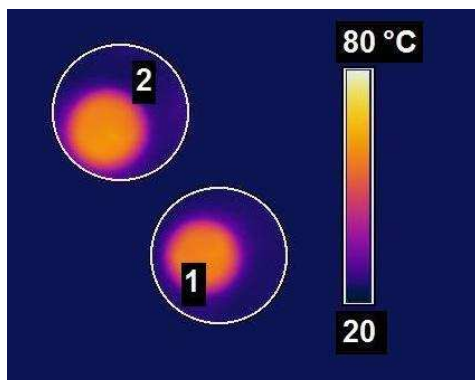
## **diplomové práce**

Příloha 1: Termogramy výstřiků získané bezdotykovým měřením

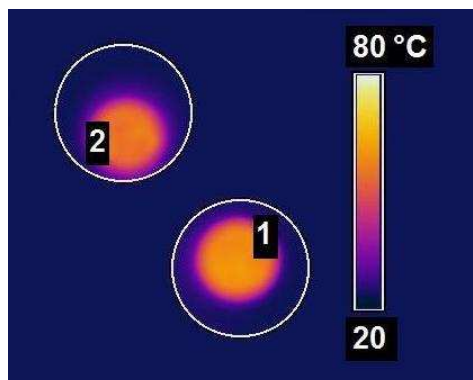
Příloha 2: Naměřené hodnoty metodou DSC

## Příloha 1: Termogramy výstřiků získané bezdotykovým měřením:

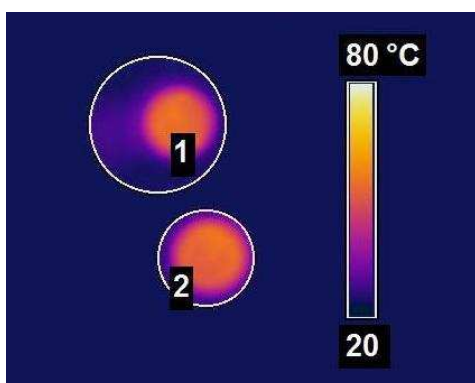
Termogramy materiálu Polypropylen Sabic PP 56M10, doba chlazení je 7 s:



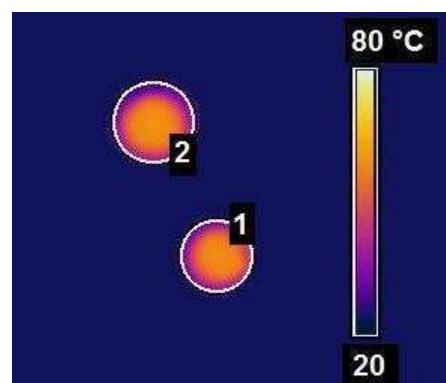
Obr. P1: Teplotní pole výstřiků PP, měření č.2, ocelová forma, konvenční chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



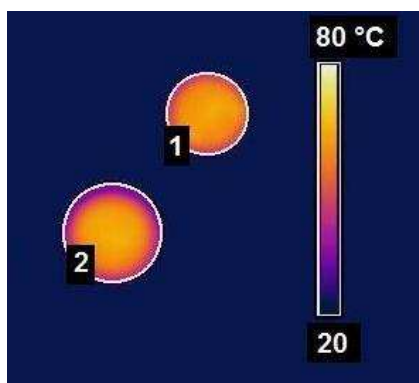
Obr. P2: Teplotní pole výstřiků PP, měření č.3, ocelová forma, konvenční chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



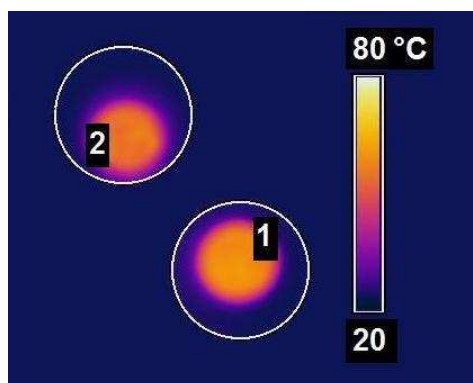
Obr. P3: Teplotní pole výstřiků PP, měření č.4, ocelová forma, konvenční chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



Obr. P4: Teplotní pole výstřiků PP, měření č. 2, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

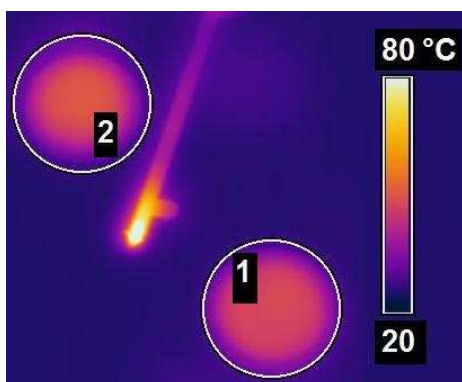


Obr. P5: Teplotní pole výstřiků PP, měření č. 3, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

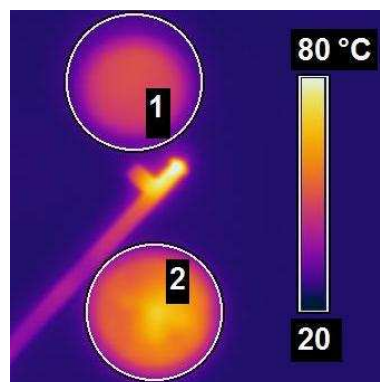


Obr. P6: Teplotní pole výstřiků PP, měření č. 4, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

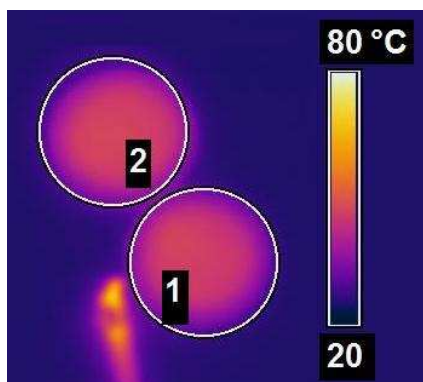
Termogramy materiálu Polypropylen Sabic PP 56M10, doba chlazení je 7 s:



Obr. P7: Teplotní pole výstřiků PP, měření č.2, laserově slinovaná bronzová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

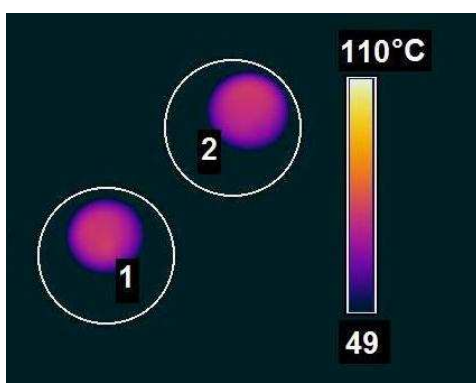


Obr. P8: Teplotní pole výstřiků PP, měření č.3, laserově slinovaná bronzová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

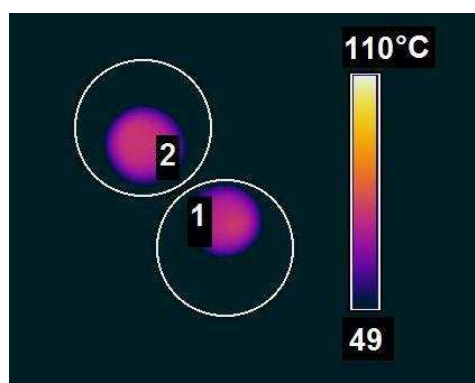


Obr. P9: Teplotní pole výstřiků PP, měření č.4, laserově slinovaná bronzová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

Termogramy materiálu Polyamid Zytel MT409AHS, doba chlazení 7 s:



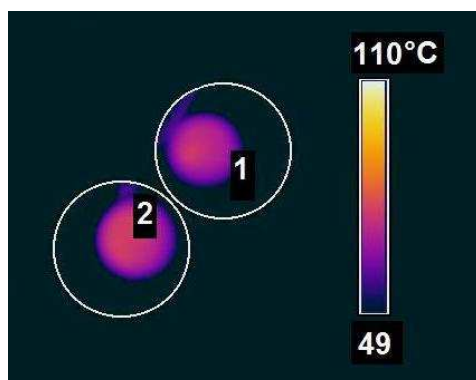
Obr. P10: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 2, ocelová forma, konvenční chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



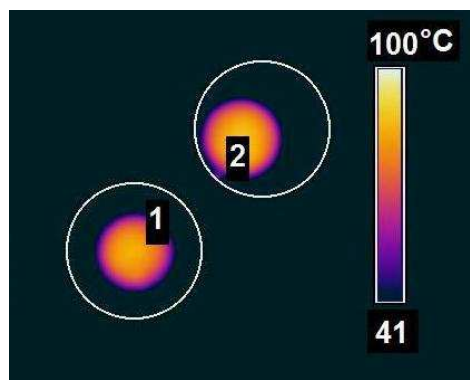
Obr. P11: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 3, ocelová forma, konvenční chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



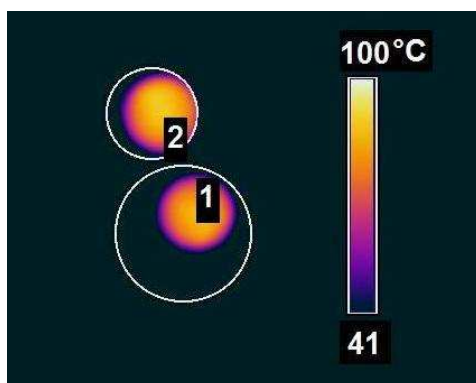
Termogramy materiálu Polyamid Zytel MT409AHS, doba chlazení 7 s:



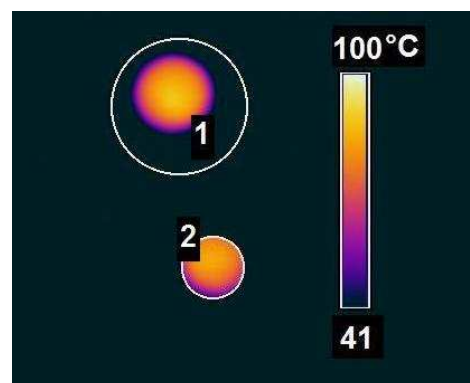
Obr. P12: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 4, ocelová forma, konvenční chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



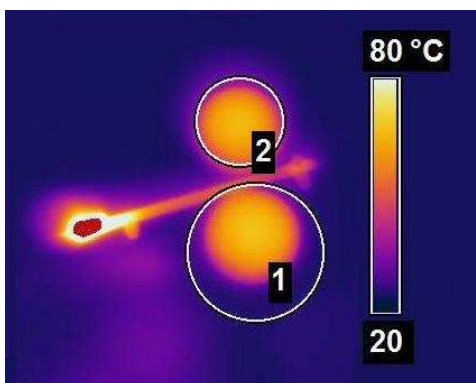
Obr. P13: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 2, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



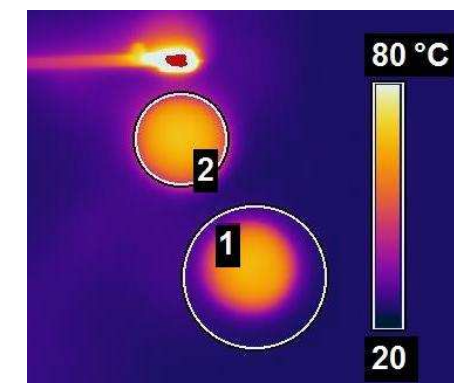
Obr. P14: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 3, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



Obr. P15: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 4, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

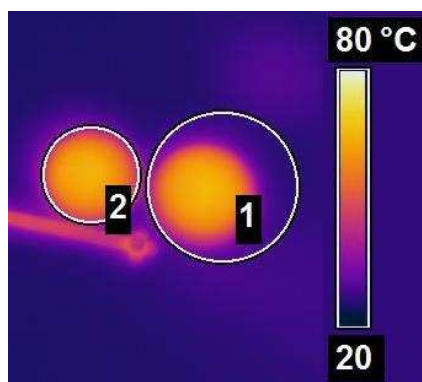


Obr. P16: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 2, laserově slinovaná bronzová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.



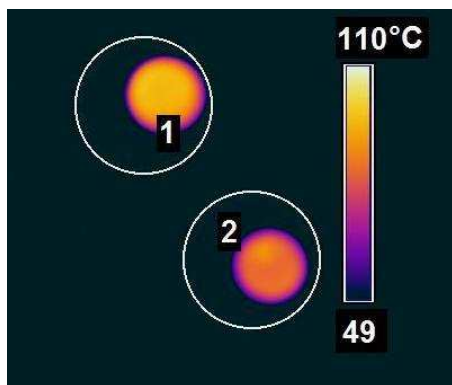
Obr. P17: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 3, laserově slinovaná bronzová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

Termogram materiálu Polyamid Zytel MT409AHS NC010, doba chlazení 7 s:

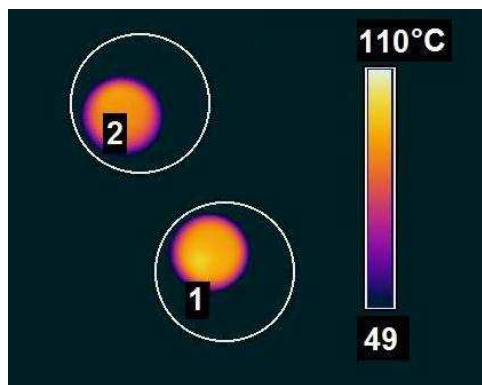


Obr. P18: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 4,  
laserově slinovaná bronzová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=7$  s.

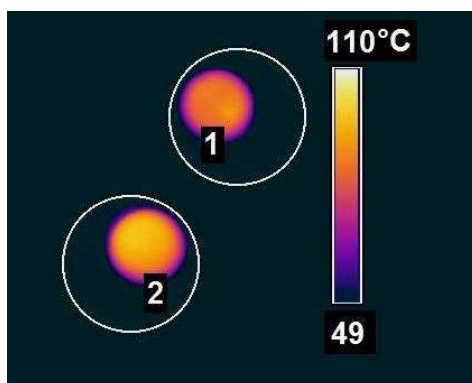
Termogram materiálu Polyamid Zytel MT409AHS NC010, doba chlazení 4 s:



Obr. P19: Teplotní pole výstřiků PA,  
měření č. 2, ocelová forma, konvenční  
chlazení,  $t_{ch}=4$  s.

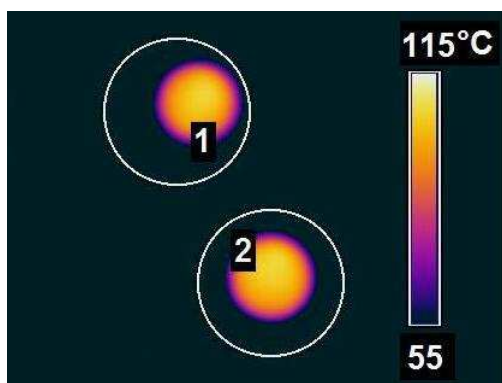


Obr. P20: Teplotní pole výstřiků PA,  
měření č. 3, ocelová forma, konvenční  
chlazení,  $t_{ch}=4$  s.

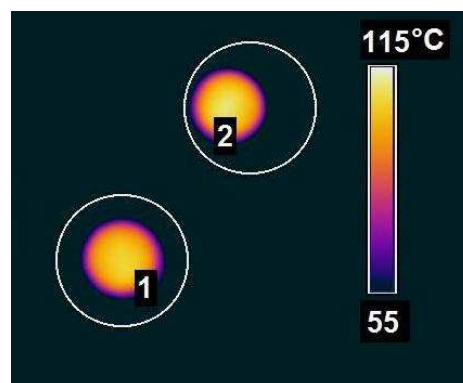


Obr. P21: Teplotní pole výstřiků PA,  
měření č. 4, ocelová forma,  
konvenční chlazení,  $t_{ch}=4$  s.

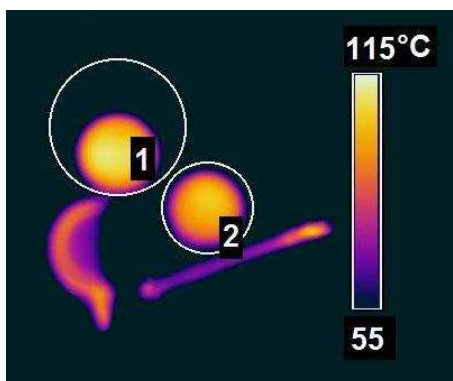
Termogram materiálu Polyamid Zytel MT409AHS NC010, doba chlazení 4 s:



Obr. P22: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 2, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=4$  s.



Obr. P23: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 3, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=4$  s.



Obr. P24: Teplotní pole výstřiků PA, měření č. 4, laserově slinovaná ocelová forma, konformní chlazení,  $t_{ch}=4$  s.

## Příloha 2: Naměřené hodnoty metodou DSC:

Tab. P1: Hodnoty entalpií tání pro výstřiky z PP při době chlazení 7 s:

Materiál formy	Entalpie tání $\Delta H_m$ [J/g]				
	měření č. 1	měření č. 2	měření č. 3	měření č. 4	měření č. 5
Klasická ocel	72,568	73,831	72,500	72,432	73,063
Laserově slinovaná ocel	72,134	73,253	72,625	71,104	71,891
Laserově slinovaný bronz	72,177	72,848	71,932	73,083	73,361

Tab. P2: Hodnoty entalpií tání pro výstřiky z PA při době chlazení 7 s:

Materiál formy	Entalpie tání $\Delta H_m$ [J/g]				
	měření č. 1	měření č. 2	měření č. 3	měření č. 4	měření č. 5
Klasická ocel	32,165	32,776	32,249	31,593	33,182
Laserově slinovaná ocel	32,382	33,508	32,978	33,104	32,178
Laserově slinovaný bronz	32,978	33,422	31,851	33,468	32,167

Tab. P3: Hodnoty entalpií tání pro výstřiky z PA při době chlazení 4 s:

Materiál formy	Entalpie tání $\Delta H_m$ [J/g]				
	měření č. 1	měření č. 2	měření č. 3	měření č. 4	měření č. 5
Klasická ocel	32,951	33,468	33,052	33,251	33,979
Laserově slinovaná ocel	33,422	32,821	32,499	32,861	32,425



### **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 28.5.2010

Podpis

### **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 28.5.2010

Signature